

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Model kosterního svalu
The model of skeletal muscle

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Skypala**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3901R039 Biomedicínský technik
Téma: Model kosterního svalu
Model of Skeletal Muscle

Zásady pro vypracování:

1. Studium problematiky funkce kosterního svalstva.
2. Vytvoření matematického modelu kosterního svalu.
3. Návrh a realizace funkčního sw modelu kosterního svalu.
4. Návrh a realizace funkčního uživatelského rozhraní pro práci s modelem.
5. Ověření funkčnosti vytvořeného modelu.
6. Vytvoření laboratorní úlohy dle šablony a standardů BME VŠB – TUO v českém a anglickém jazyce včetně vzorového protokolu.
7. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KITTNAR, Otomar. *Lékařská fyziologie*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011. 790 s. ISBN 978-80-247-3068-4.
[2] PENHAKER, Marek, Petr TIEFENBACH a František KOBZA. *Lékařská kybernetika*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. 80 s. ISBN 978-80-248-1561-9.
[3] ECK, Vladimír. *Bionika*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, Elektrotechnická fakulta, 1998. 161 s. ISBN 80-010-1845-8.
[4] KITTNAR, Otomar a Mikuláš MLČEK. *Atlas fyziologických regulací: 329 schémat*. 1. vyd. Praha: Grada, 2009. 316 s. ISBN 978-80-247-2722-6.
[5] ECK, Vladimír a Miroslav RAZÍM. *Biokybernetika*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, Elektrotechnická fakulta, 1996. 155 s.
[6] WIJK VAN BRIEVINGH, Rogier P. a Dietmar MÖLLER. *Biomedical modeling and simulation on a PC: a workbench for physiology and biomedical engineering*. New York: Springer-Verlag, c1993. xvi, 517 p. ISBN 3-540-97650-7.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Augustynek**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě, 2013

A handwritten signature in blue ink, reading 'Skypala' in a cursive script.

Martin Skypala

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Martinu Augustynkovi za cenné připomínky a komentáře během řešení celé práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Martinu Piešovi, Ph.D. za pomoc při realizaci grafického uživatelského rozhraní.

Abstrakt

Tato práce je orientovaná na kontrakci kosterního svalu. Hlavním bodem je vytvoření modelu izometrická kontrakce v prostředí programu Matlab/Simulink, včetně grafického uživatelského rozhraní.

Klíčová slova

sval, kontrakce, modelování biologických systémů

Annotation

This thesis is oriented on the skeletal muscle contraction. The main point of this thesis is creating the model of isometric contraction using Matlab/Simulink software, including graphical user interface.

Key words

muscle, contraction, modeling of biological systems

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Fyziologie kosterního svalu	2
2.1.1	Aktinové filamentum.....	3
2.1.2	Myozinové filamentum	3
2.1.3	Titinové filamentum	4
2.1.4	Transverzální tubuly (T-systém)	4
2.2	Činnost svalu	5
2.2.1	Excitace	5
2.2.2	Kontrakce	5
2.3	Mechanické vlastnosti svalu.....	6
2.3.1	Vztah mezi silou kontrakce a výchozí délkou svalu	6
2.3.2	Svalový tonus	7
2.3.3	Tetanus	8
3	Fyzikální podstata kontrakce svalu	9
3.1	Vztah mezi silou a rychlostí kontrakce	9
3.1.1	Získání parametrů.....	10
3.1.2	Některá řešení Hillova modelu.....	12
3.2	Jednotlivé složky svalové síly	14
4	Návrh SW modelu kosterního svalu.....	16
4.1	Koncentrace Ca^{2+} iontů	16
4.2	Síla generovaná kontraktilním aparátem svalu	18
4.3	Celková síla svalu	18
5	Výsledky SW modelu kosterního svalu	20
6	Návrh uživatelského rozhraní.....	24
7	Ověření funkčnosti modelu	28
7.1	Extrémní případy modelu.....	29
8	Závěr	31
9	Použité zdroje.....	32
10	Obsah přiloženého CD	33
11	Seznam příloh.....	34

1 Úvod

Tato práce je zaměřena na realizaci modelu kosterního svalu.

V teoretické části jsou shrnuty základní poznatky z fyziologie kosterní svaloviny. Je zde popsána základní struktura svalového vlákna a děje nezbytné pro vznik samotné kontrakce. Dále je zde zahrnut obecný matematický popis svalového chování a rozbor svalových sil pomocí Hillova modelu.

V praktické části práce se již přistupuje k samotnému návrhu a realizaci softwarového modelu izometrické kontrakce kosterního svalu. Ten je realizován v prostředí programu Matlab (Simulink). Pro efektivní práci s modelem je zde také vytvořeno grafické uživatelské rozhraní.

V závěrečné části jsou shrnuty výsledky simulace a také je zde obsažena kapitola související se zvýšením spolehlivosti chování modelu.

Práce je navíc obohacena o jednoduchou laboratorní úlohu, která spočívá v různém nastavování některých parametrů pomocí uživatelského rozhraní a následném sledování jejich vlivu na výsledky simulace.

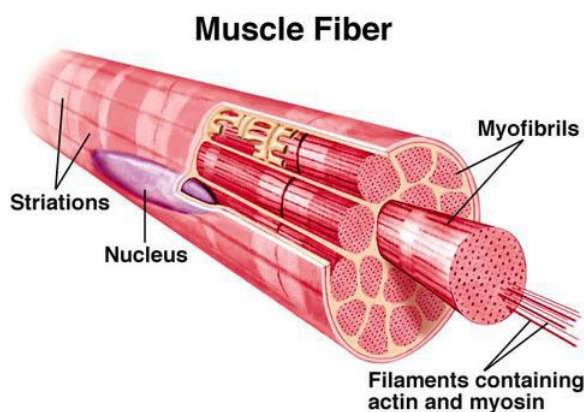
2 Fyziologie kosterního svalu

Základní stavební jednotkou příčně pruhovaného svalu je svalové vlákno. Svalové vlákno je přibližně 10 – 100 μm široké a jeho délka je rovna vzdálenosti od jednoho úponu k druhému (může se tedy jednat o pár mm, ale také několik desítek cm). Jednotlivá vlákna vytvářejí svalové snopečky obalené vrstvou kolagenního vaziva, ty potom vytvářejí snopce a nakonec celé břicho svalu. Síť kolagenního vaziva poté na koncích svalu přechází ve šlachové úpony. [1]

Povrchová membrána svalového vlákna se nazývá sarkolema, jeho cytoplazma je sarkoplazma a jeho mitochondrie jsou označovány jako sarkosomy. [1]

Podjednotkou svalového vlákna je myofibrila. Myofibrily jsou dále děleny na úseky zvané sarkomery. Právě sarkomera představuje základní funkční uspořádání pro schopnost svalu kontrahovat se. [1]

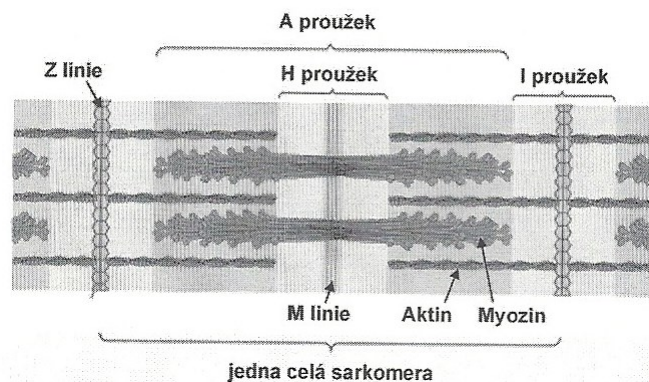
Samotná kontrakce je odpovědí na vznik akčního potenciálu. Ten vzniká v důsledku přenosu vzruchu z CNS na sval přes nervosvalovou ploténku. [1]



Obrázek 2-1: Svalové vlákno. [7]

Sarkomery jsou od sebe navzájem odděleny tzv. Z-disky. Kolmo ve struktuře Z-disku jsou na obou stranách ukotvena aktinová (tenká) filamenta. Mezi nimi jsou uložena myozinová (tlustá) filamenta tak, že se oba typy filament částečně překrývají. Myozinová filamenta jsou navíc napříč jejich středy spojena bílkovinnou strukturou, označovanou jako M-linie. Osu celé sarkomery tvoří titin, jehož vlákna spojují Z-disky s M-liniemi (Obrázek 2-5). [1] [2]

Celá sarkomera je tak rozdělena na několik segmentů – Z-disk, I-pás, A-pás. Z-disk představuje oddělení dvou sousedních sarkomer. Jako I-pás bývají označeny úseky pouze myozinových vláken. A-pás představuje úsek, kde se vyskytují pouze filamenta aktinu (tzv. H-zóna) a dva úseky po stranách, kde jsou společně zaklíněna aktinová i myozinová vlákna (Obrázek 2-2). [1] [2]



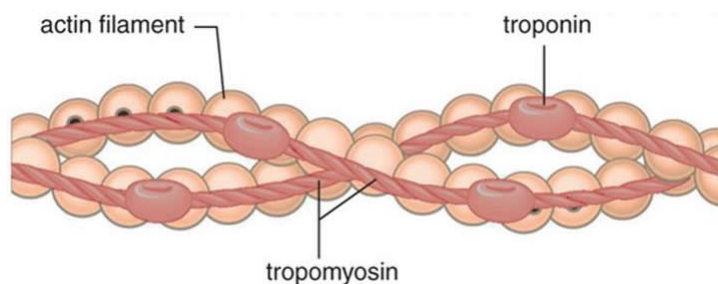
Obrázek 2-2: Sarkomera. [1]

2.1.1 Aktinové filamentum

Stavbu aktinového filamenta si lze představit jako dvojici kolem sebe obtočených vláken F-aktinu, obsahujících kulovité monomery G-aktinu. Celá struktura tak připomíná dva do sebe zamotané náhrdelníky perel. [2]

Ve štěrbinách, vytvořených uspořádáním vláken F-aktinu, jsou uloženy vláknité molekuly tropomyozinu. Na jednu molekulu tropomyozinu je navázána jedna molekula troponinu. Každá molekula troponinu je tvořena třemi podjednotkami:

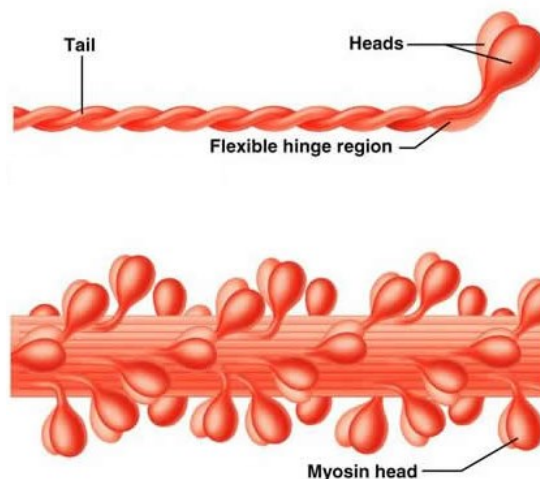
- Troponin C – představuje místo pro navázání iontů Ca^{2+} uvolněných do vnitřního prostředí sarkomery.
- Troponin T – slouží ke spojení troponinu s tropomyozinem.
- Troponin I – zabraňuje interakci aktinového a myozinového vlákna. Tento blokační účinek je odstraněn právě přítomností vápníkových iontů v sarkomeře. [2]



Obrázek 2-3: Vlákno aktinu. [8]

2.1.2 Myozinové filamentum

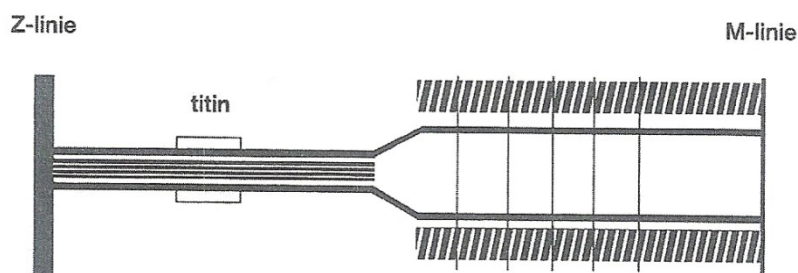
Vlákno myozinu je tvořeno kulovitým uspořádáním molekul obsahujících krčky s globulárními hlavami. Tyto globulární hlavy mají tvar podobný kávovému zrnku, který je ideální pro připojení molekuly ATP a následné spojení hlavy s vláknem aktinu. [2]



Obrázek 2-4: Vlákno myozinu. [9]

2.1.3 Titinové filamentum

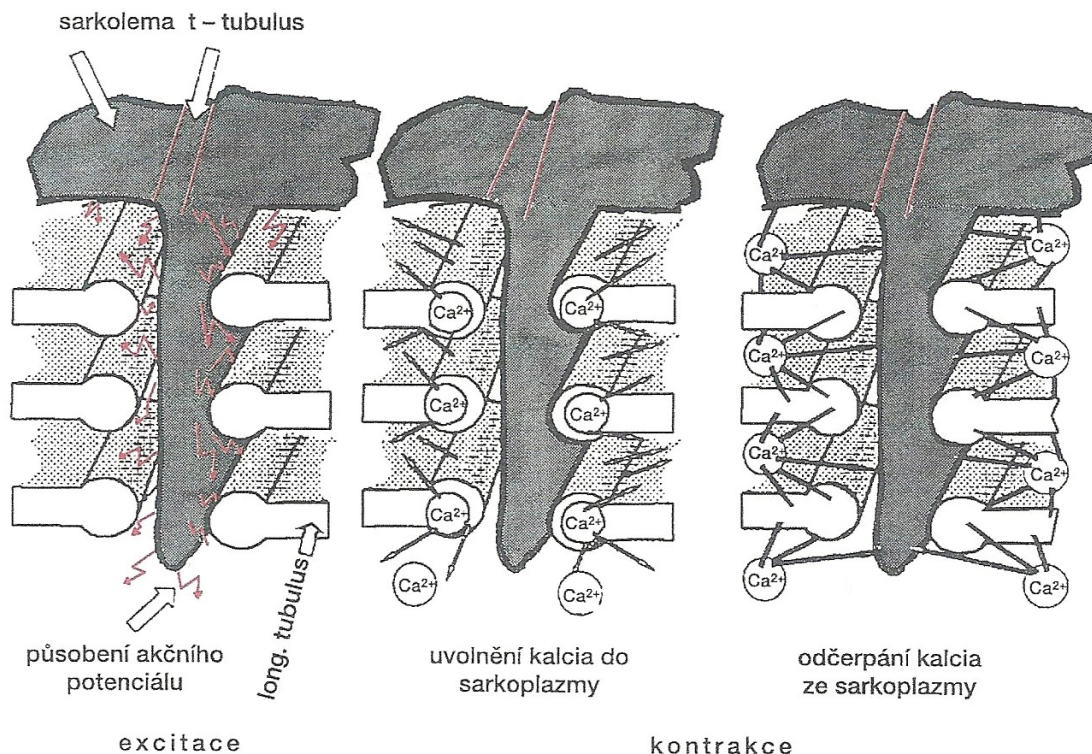
Jedná se o vlákno obrovské molekuly bílkoviny – titinu. Titinová vlákna sahají od Z-disku až k M-linii, čímž tvoří jakousi podélnou výztuhu sarkomery. Podílí se tak i na klidové tenzi relaxovaného svalu. Titin je zároveň hlavním generátorem pasivní elastické síly, která působí proti protažení svalu. [2] [3]



Obrázek 2-5: Vlákno titinu. [2]

2.1.4 Transverzální tubuly (T-systém)

Jde o soustavu tubulárních útvarů, tvořených membránou svalového vlákna. Tyto tubuly se zanořují kolmo k myofibrilám a probíhají v těsné blízkosti longitudinálních tubulů, což jsou uzavřené útvary sarkoplazmatického retikula, ve kterých jsou koncentrovány ionty Ca^{2+} . Longitudinální tubuly se dále rozšiřují v terminální cisterny a spolu s T-systémem vytvářejí tzv. triády. [2]



Obrázek 2-6: Spřažení excitace a kontrakce. [2]

2.2 Činnost svalu

Základem pro vznik svalové kontrakce je excitace. V zásadě se jedná o podráždění svalu prostřednictvím vzruchu z CNS, na které sval odpoví kontrakcí. Kontrakce může být dvojího typu. Rozlišujeme kontrakci izometrickou a kontrakci izotonickou. Při izometrické kontrakci se mění pouze napětí svalu, ale délka zůstává stejná (statická výdrž). Izotonická kontrakce je naopak provázána změnou délky svalu při konstantním napětí. V drtivé většině fyziologických pohybů se však ani jeden druh kontrakce nevyskytuje v čisté formě a jedná o kombinaci obou typů kontrakcí, kde jeden může výrazně převažovat. [1][2]

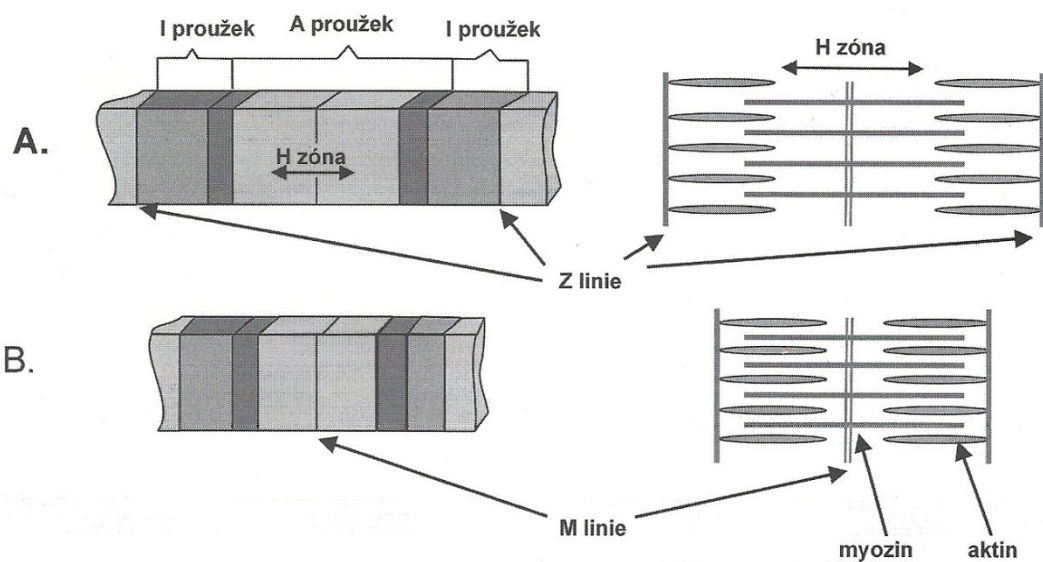
2.2.1 Excitace

Axony motoneuronů vytvářejí spolu se sarkolemou svalového vlákna tzv. nervosvalové ploténky. Jde o struktury, které umožňují přenos vzruchu na sval. Tento přenos způsobí uvolnění acetylcholinu, který působí na acetylcholinové receptory nikotinového typu na sarkolemě, řídící kanály pro Na^+ . Dochází k průniku Na^+ iontů do sarkoplazmy a tím k místní depolarizaci. V případě, že tato depolarizace dosáhne určité prahové hodnoty, dojde k vybavení akčního potenciálu. [2]

2.2.2 Kontrakce

Akční potenciál je dále šířen podél transverzálních tubulů přímo do nitra svalového vlákna. Tento děj způsobí masivní uvolnění iontů Ca^{2+} do sarkoplazmy a jejich následné navázání na troponin C, v důsledku čehož dojde k zasunutí tropomyozinu hlouběji do šterbiny a vazebná

místa pro globulární hlavy myozinu tak mohou být odkryta. Po interakci filament aktinu a myozinu nastává štěpení molekuly ATP, uložené v globulární hlavě, a za pomoci uvolněné energie dochází k ohybu hlavy. Výsledkem tohoto ohybu je posun myozinu po aktinu, což se projeví zkrácením svalu. Dochází tedy k zúžení I-pásů a H-zóny a naopak k rozšíření úseků, ve kterých jsou filamenta vzájemně překryta. V okamžiku, kdy se na globulární hlavu naváže další molekula ATP, spojení se uvolní, hlava se vrací do původní polohy a v případě dalšího podráždění se celý proces opakuje. [1] [2]



Obrázek 2-7: A - relaxovaná sarkomera. B - kontrahovaná sarkomera. [1]

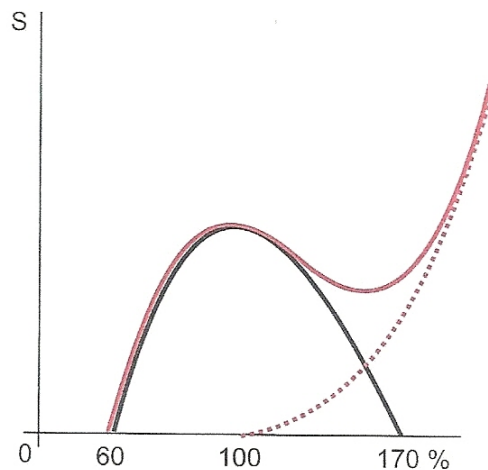
2.3 Mechanické vlastnosti svalu

Každý sval má jistou klidovou délku. V momentě jejího překročení a dalšího protahování se uplatňují elastické vlastnosti svalu a ten klade odpor. V okamžiku, kdy protahování pomine, sval se rychle vrací do své původní délky. Při dalším protahování elastická síla narůstá a v jistém kritickém momentu se sval trhá. [2]

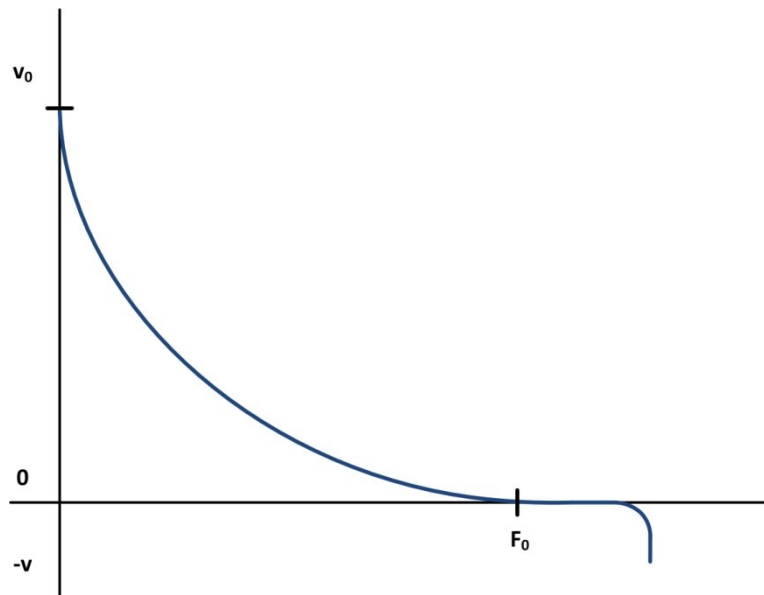
2.3.1 Vztah mezi silou kontrakce a výchozí délkou svalu

Je důležité si uvědomit, že pro maximální sílu svalu je nutno dosáhnout ideálního zkrácení sarkomery, tj. docílit optimálního počtu můstků. V momentě kdy je sarkomera příliš protažena, překrytí filament je nedostačující a můstků se vytvoří málo. Opačný případ, kdy je překrytí filament příliš velké, má rovněž negativní vliv na výslednou sílu. [2]

Správnou délku sarkomery lze vypočítat z grafu Gordonovy křivky. Jedná se o délku zhruba $2,1 - 2,2 \mu\text{m}$, což je klidová délka, při které sval ještě nevyvíjí pasivní elastickou sílu (Obrázek 2-8). [2]



Obrázek 2-8: Závislost síly na délce svalu: černá – Gordonova křivka; přerušované – pasivní elastická síla; červená – celková síla svalu. Svislá osa – síla; vodorovná – délka svalu v % klidové délky. [2]



Obrázek 2-9: Hillova křivka. [2]

Hillova křivka ukazuje závislost rychlosti změny délky svalu na zátěži. Se vzrůstající zátěží svalu klesá rychlost změny jeho délky. F_0 představuje maximální sílu zátěže, kterou sval udrží v rovnováze, v_0 je potom maximální rychlost délkové změny.

2.3.2 Svalový tonus

Jako svalový tonus je běžně označováno klidové napětí svalu. Bývá rozlišován tonus reflexní a tonus, vycházející z elastických struktur svalu. [1]

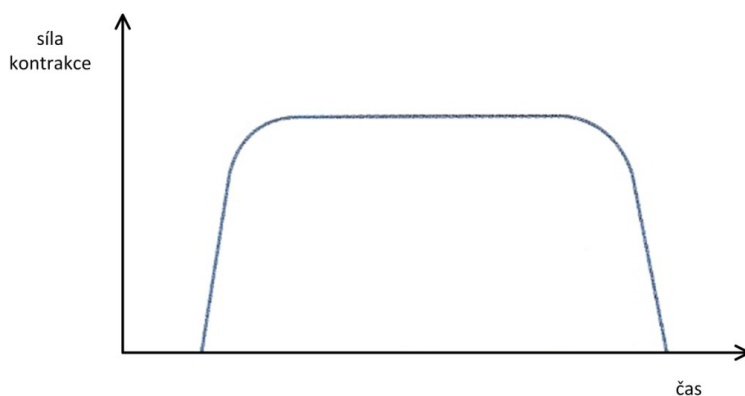
Tonus, který vychází z elastických struktur svalu, představuje ideální výchozí polohu svalu pro kontrakci. Tento tonus existuje dlouhodobě, bez jakýchkoli energetických nároků a nevykazuje žádné známky únavy, ani činnostní potenciály. [1]

Naproti tomu reflexní tonus lze přirovnat k slabé izometrické kontrakci. Na jeho řízení se podílejí signály ze svalových vřetének a receptorů ze šlach a kloubních pouzder. Reflexní tonus také hraje klíčovou roli ve schopnosti náhlé, rychlé kontrakce. [1]

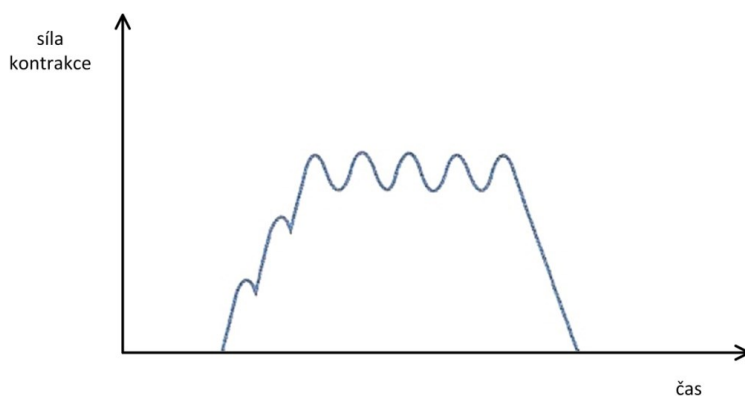
2.3.3 Tetanus

Na jeden akční potenciál reaguje sval jedním škubnutím. Tento jeden impuls však nestačí ke vzniku kontrakce v pravém slova smyslu. V případě několika po sobě jdoucích akčních potenciálů, dochází k sumaci a výsledné zkrácení nebo napětí svalu je mnohonásobně větší. Tento sled několika impulsů po sobě bývá označován jako tetanus. [1][2]

Rozlišujeme tetanus dvojího typu. Pokud další podráždění nastane až v sestupné části záškubu, hovoříme o tzv. vlnitém tetanu. Jestliže však další vzruch přijde ještě před vrcholem záškubu, nasedá na zbytkovou kontrakci z předchozího škubnutí a výsledná kontrakce je tak daleko intenzivnější. V tomto případě jde o tetanus hladký. [2]



Obrázek 2-10: Hladký tetanus. [2]



Obrázek 2-11: Vlnitý tetanus. [2]

3 Fyzikální podstata kontrakce svalu

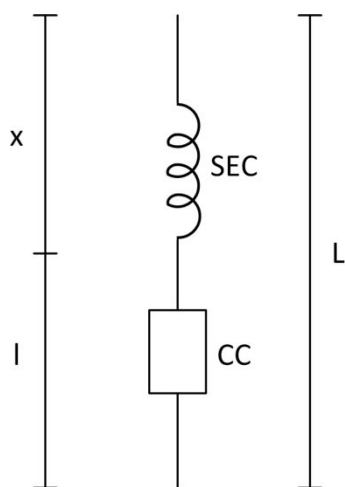
Pro popis svalových sil je nejčastěji využíváno dvou modelů – Hillova a Huxleyho. Pro tuto práci byl pro menší složitost při zachování dostatečné podrobnosti zvolen model Hillův.

3.1 Vztah mezi silou a rychlostí kontrakce

Hillův model, vytvořen A. V. Hillem v roce 1938, je jedním z prvních modelů svalu, který vznikl ještě předtím, než byl znám detailní anatomický popis sarkomery. Hill vyzníval, že při kontrakci svalu proti konstantní zátěži (izotonická kontrakce), může být vztah mezi konstantní rychlostí zkracování v a zátěží p popsán silově-rychlostní rovnicí

$$(p + a) \cdot v = b \cdot (p_0 - p), \quad (3.1-1)$$

kde a a b jsou konstanty určeny experimentálně. Typická silově-rychlostní křivka (Hillova křivka) je znázorněna na obrázku 2-9. Jestliže $p = p_0$, kde p_0 (v obrázku 2-9 značeno jako F_0) reprezentuje maximální sílu generovanou svaem při konstantní délce (izometrickou sílu), potom je rychlost $v = 0$. Protože napětí generované kosterním svaem při izometrickém tetanu téměř nezávisí na délce, p_0 je také na délce téměř nezávislá. V případě, kdy $p = 0$, je maximální rychlost, kterou se sval může zkracovat $v = bp_0/a$. [4]



3-1: Hillův model. [4]

Pro názornost je svalové vlákno modelováno prostřednictvím mechanického modelu jako kontraktilní komponenta (CC), s daným silově-rychlostním vztahem, v sérii s elastickou komponentou (SEC). V některých verzích modelu je také zahrnuta paralelní elastická komponenta, ale protože zde nehraje podstatnou roli, byla vynechána. [4]

Z obrázku 3-1 lze vypožorovat, že:

- l = délka kontraktilní komponenty
- x = délka elastické komponenty
- $L = l + x$ = celková délka svalu [4]

Rychlost kontrakce kontraktilní komponenty je potom dána vztahem

$$v = -\frac{dl}{dt} \quad (3.1-2)$$

za předpokladu, že v je ve vztahu k zátěži podle silově-rychlostní rovnice. [4]

K odvození diferenciální rovnice pro časovou závislost p bylo využito toho, že elastická komponenta je v sérii s komponentou kontraktilní, tj. mají stejnou sílu. Předpokládá se, že zátěž elastické komponenty je funkcí její délky, tedy $p = P(x)$. S využitím silově-rychlostní rovnice lze získat

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= \frac{dP}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \\ &= \frac{dP}{dx} \cdot \left[\frac{dL}{dt} - \frac{dl}{dt} \right] \\ &= \frac{dP}{dx} \cdot \left[\frac{dL}{dt} + v \right] \\ &= \frac{dP}{dx} \cdot \left[\frac{dL}{dt} + \frac{b(p_0 - p)}{p + a} \right]. \end{aligned} \quad (3.1-3)$$

Zbývá tedy určit dP/dx . [4]

Hill vycházel z předpokladu, že elastická komponenta je lineární a proto

$$P = \alpha \cdot (x - x_0), \quad (3.1-4)$$

kde x_0 je klidová délka svalu a tedy

$$\frac{dP}{dx} = \alpha. \quad (3.1-5)$$

Diferenciální rovnice pro p je potom

$$\frac{dp}{dt} = \alpha \cdot \left[\frac{dL}{dt} + \frac{b \cdot (p_0 - p)}{p + a} \right]. \quad (3.1-6)$$

3.1.1 Získání parametrů

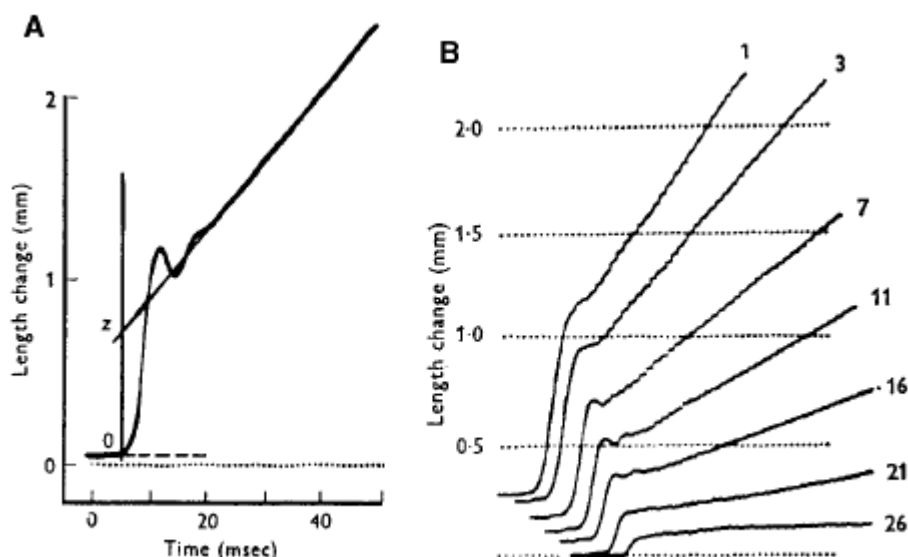
Je předpokládáno, že sval v tetanu má určité napětí až do chvíle, dokud nedosáhne své izometrické délky. V tomto okamžiku toto napětí prudce poklesne a je ustáleno na nižší úrovni. Právě tento děj je interpretován grafem na obrázku 3-2, kde je vykreslena délková změna svalu v čase. Jakmile dojde k poklesu napětí, sval se vlivem elastické komponenty zkrátí (vykresleno ve vertikálním směru). Po přechodové periodě, během níž délka vykazuje drobné oscilace, se sval

zkracuje s konstantní rychlostí. Vykreslením míry zkrácení proti konstantně aplikovanému napětí je možno získat jeden bod silově-rychlostní křivky. Konkrétněji, jestliže napětí klesne z p_0 na p_1 , sval se kontrahuje s konstantní rychlostí v , kde

$$(p_1 + a) \cdot v = b \cdot (p_0 - p_1). \quad (3.1-7)$$

Opakování experimentu pro různé napěťové skoky umožňuje nalézt sérii bodů a zkonstruovat tak průběh silově-rychlostní křivky, ze kterého je možno získat hodnoty a , b a p_0 . To však platí pouze v případě, kdy p_0 je neměnné. Jinými slovy, je nezbytné, aby p_0 během zkracování svalu konstantní rychlostí zůstalo neměnné. [4]

Podobně mohou být určeny charakteristiky elastické komponenty z počátečního délkového skoku. Protáhnutím linie zkracování svalu a jejím protnutím se svislou osou lze získat bod z , jehož vzdálenost od 0 je rovna délkové změně elastické komponenty. To je podepřeno tvrzením, že silově-rychlostní vlastnosti svalu se mění okamžitě se změnou napětí. [4]



Obrázek 3-2: Grafy závislosti délkové změny svalu v čase. [4]

Grafy na obrázku 3-2 znázorňují délkovou změnu svalu v čase. Část A reprezentuje délkovou změnu v čase po napěťovém poklesu. Sval se náhle zkrátí a poté, po počáteční oscilační fázi, jeho délka dále klesá s konstantní rychlostí. Průběhy v části B představují délkovou změnu jako funkci času ze série několika napěťových poklesů. Pro větší čitelnost byly průběhy posunuty. Každý z bodů horizontální osy představuje 1 ms. Hodnota vpravo od křivek ukazuje vždy konečnou hodnotu svalového napětí v gramech. [4]

3.1.2 Některá řešení Hillova modelu

Izometrický tetanus

Jestliže je sval vlivem opakované stimulace uveden do tetanu, jeho izometrické napětí v průběhu času roste. Protože se jedná o izometrickou kontrakci, délka svalu zůstává stejná a tedy $dL/dt = 0$. Diferenciální rovnice pro napětí je potom

$$\frac{dp}{dt} = \alpha \cdot \left[\frac{b \cdot (p_0 - p)}{p + a} \right]. \quad (3.1-8)$$

Integrací od 0 do t , s využitím počáteční podmínky $p(0) = 0$, je obdržena rovnice

$$-p - (p_0 + a) \cdot \log\left(\frac{p_0 - p}{p_0}\right) = \alpha b t, \quad (3.1-9)$$

která popisuje časový průběh změny napětí. Platí, že $t \rightarrow \infty$, $p \rightarrow p_0$. [4]

Uvolnění svalu při konstantní rychlosti

Je předpokládáno, že sval, který měl původně stabilní izometrické napětí p_0 , se začne kontrahovat s konstantní rychlostí u . Je přirozené, že napětí bude v průběhu kontrakce klesat, dokud nedosáhne hodnoty p_u , určené ze silově-rychlostní křivky pro rychlost u . Diferenciální rovnice pro napětí p bude mít pak podobu

$$\frac{dp}{dt} = \alpha \cdot \left[-u + \frac{b \cdot (p_0 - p)}{p + a} \right], \quad (3.1-10)$$

s počáteční podmínkou $p(0) = p_0$. Řešením je potom

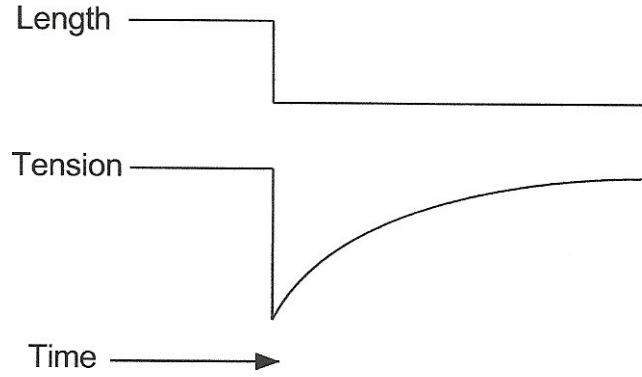
$$p_0 - p + (p_u + a) \cdot \log\left(\frac{p_0 - p_u}{p - p_u}\right) = \alpha t(b + u), \quad (3.1-11)$$

kde p_u je definováno pomocí $(p_u + a) + u = b \cdot (p_0 - p_u)$. Platí, že $t \rightarrow \infty$, $p \rightarrow p_u$. [4]

Odezva na délkový skok

Pravděpodobně nejzajímavějším řešením je odezva na prudký pokles délky svalu. Toto řešení však zároveň odhaluje některé nedostatky popisu všech aspektů svalového chování pomocí Hillova modelu. [4]

Předpokládá se, že sval se stálým izometrickým napětím p_0 se náhle zkrátí, v důsledku čehož dojde k náhlému poklesu napětí. Po chvíli však dojde k jeho návratu zpět na hodnotu p_0 . Tento fakt je dán tím, že izometrické napětí sice není závislé na délce, ale jeho vyvinutí na jiné délce trvá nějakou dobu. [4]



Obrázek 3-3: Schematický diagram odezvy na zkrácení svalu. [4]

Přesněji, lze předpokládat, že délka svalu jako funkce času je dána

$$L(t) = L_1 + L_0 - L_0 H(t), \quad (3.1-12)$$

kde $H(t)$ je běžná Heavisideova funkce a kde L_1 a L_0 jsou konstanty, přičemž L_0 je délkového skoku. Tedy

$$\frac{dL}{dt} = -L_0 \delta(t), \quad (3.1-13)$$

kde $\delta(t)$ představuje Diracovu delta funkci. Dosazením do diferenciální rovnice pro p lze potom získat

$$\frac{dp}{dt} = \alpha \cdot \left[-L_0 \delta(t) + \frac{b \cdot (p_0 - p)}{p + a} \right], \quad (3.1-14)$$

$$p(0^-) = p_0. \quad (3.1-15)$$

Integrací od $t = \epsilon$ do $t = -\epsilon$, když $\epsilon \rightarrow 0$, obdržíme

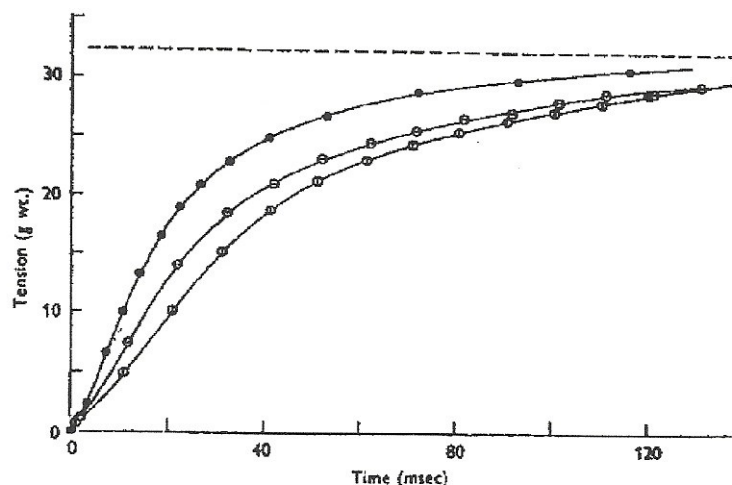
$$p(0^+) - p(0^-) = -\alpha L_0 \quad (3.1-16)$$

a tedy delta funkce způsobuje skok napětí $-\alpha L_0$ do původní hodnoty p . Proto rovnice (3.1-14) může být zapsána jako

$$\frac{dp}{dt} = \alpha \cdot \left[\frac{b \cdot (p_0 - p)}{p + a} \right], t > 0, \quad (3.1-17)$$

$$p(0) = p_0 - \alpha L_0. \quad (3.1-18)$$

Výše popsané řešení však zcela nesouhlasí se skutečným napětovým zotavením po zkrácení svalu. [4]



Obrázek 3-4: Srovnání výsledků Hillova modelu s výsledky reálnými. [4]

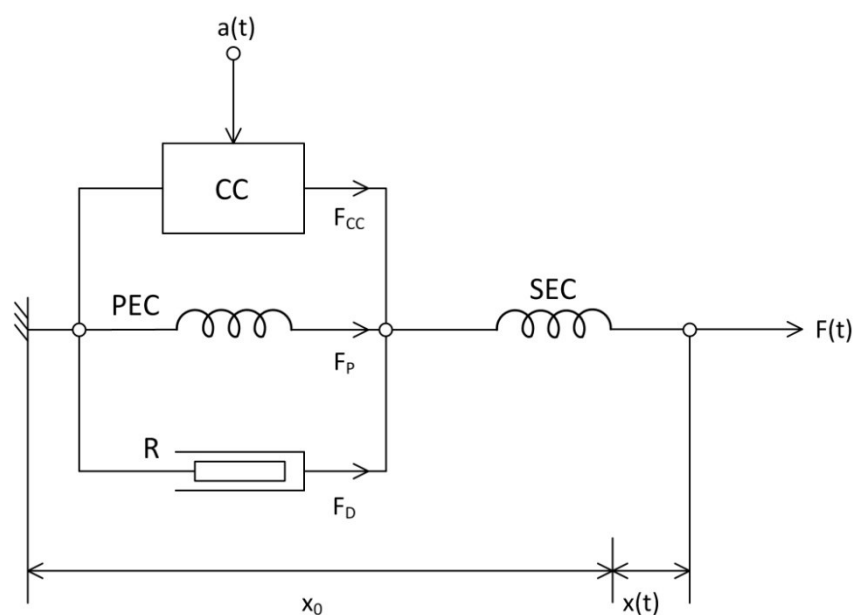
Na obrázku 3-4 lze vidět srovnání reálných průběhů s výsledky Hillova modelu. Horní křivka, proložena plnými body, je průběhem výsledků Hillova modelu. Dvě zbývající křivky jsou výsledky dvou lehce odlišných experimentálních metod. Ze srovnání je patrné, že napětí se ve skutečnosti navrácí na hodnotu p_0 pomaleji, než předpovídá model. [4]

Z tohoto důvodu bývají někdy využívány jiné modely, jejichž předlohou je daleko složitější model, který již bere v úvahu i strukturu sarkomery – Huxleyho.

3.2 Jednotlivé složky svalové síly

Základní mechanický model Hillova typu využívá pružin a tlumiče k popisu jednotlivých složek svalové síly.

Je zde modelována kontraktilní část svalu (tj. uspořádání aktinových a myozinových vláken) CC , generující aktivní sílu F_{CC} , spolu s paralelní elastickou komponentou PEC , která představuje elasticitu ve formě vaziva, generující pasivní elastickou sílu svalu F_P . Dále je zde sériová elastická komponenta SEC , zastupující šlachy, které přenášejí a pohlcují aktivní sílu F_{CC} . Poslední silou je síla F_D , reprezentovaná tlumícím elementem R , představující zátěž svalu. [5]



Obrázek 3-5: Model Hillova typu. [5]

Celková délka svalu je složena z jeho klidové délky x_0 a délkové změny $x(t)$. [5]

$$x = x_0 + x(t) \quad (3.2-1)$$

Síla F_{CC} závisí na koncentraci, $a(t)$, Ca^{2+} iontů uvolněných do sarkoplazmy. [5]

$$F_{CC} = A \cdot a(t) \quad (3.2-2)$$

Síla kontraktilní komponenty CC a sériové elastické komponenty SEC je kvůli jejich sériovému uspořádání stejná. [5]

Síla paralelní elastické komponenty F_P je závislá na délkové změně $x(t)$. [5]

$$F_P = B \cdot x(t) \quad (3.2-3)$$

Síla F_D tlumicího elementu R je závislá na rychlosti změny délky svalu, tj. změna délky svalu za jednotku času $dx(t)/dt$. [5]

$$F_D = C \cdot \frac{dx(t)}{dt} \quad (3.2-4)$$

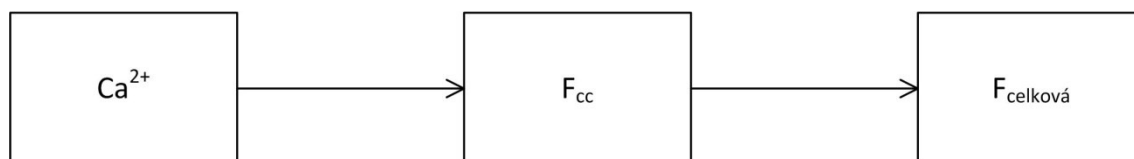
Součet těchto složek nám potom dává celkovou sílu svalu:

$$F = F_{CC} + F_P + F_D \quad (3.2-5)$$

4 Návrh SW modelu kosterního svalu

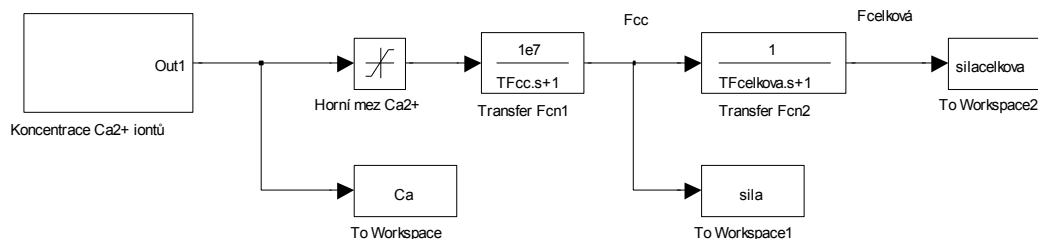
Cílem modelu je interpretovat obecné poznatky z fyziologie kosterního svalstva prostřednictvím grafických ukázek průběhů jednotlivých dějů, od vzestupu koncentrace Ca^{2+} až po výstup v podobě celkové síly svalu.

Model je realizován pomocí lineárních bloků v prostředí programu Simulink, bez jakéhokoli pokusu o korespondenci s anatomii. Je složen celkem ze tří částí. První část představuje seskupení bloků, jehož výstupem je průběh výsledné koncentrace Ca^{2+} iontů ve svalu. Na tento oddíl navazuje blok, který podává informaci o průběhu aktivní síly generované kontraktilním aparátem svalu a poslední část reprezentuje celkovou sílu svalu.



Obrázek 4-1: Blokové schéma modelu izometrické kontrakce kosterního svalu.

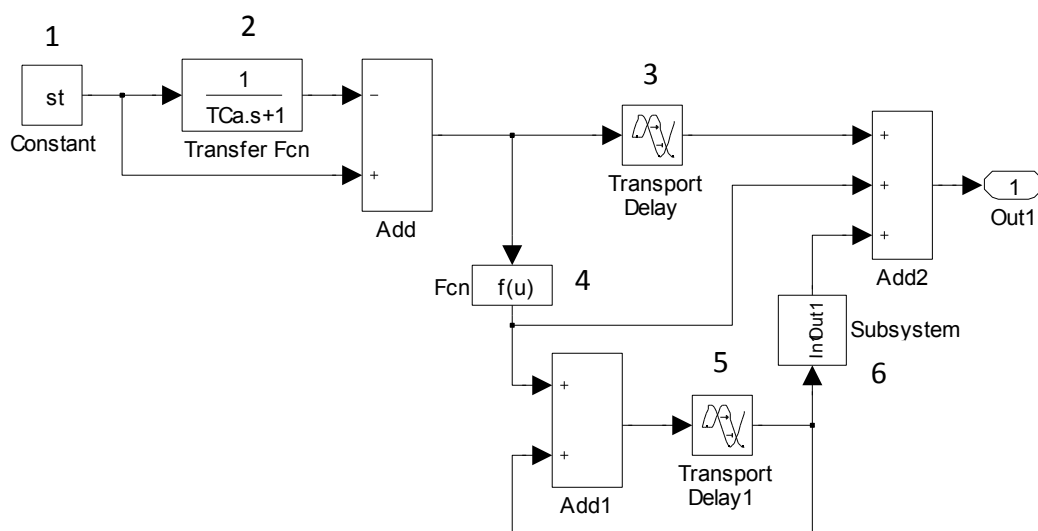
Jednotlivé části řetězce potom kopíruje seskupení bloků v prostředí Simulinku (Obrázek 4-2).



Obrázek 4-2: Model izometrické kontrakce svalu v prostředí programu Simulink.

4.1 Koncentrace Ca^{2+} iontů

Oddíl, jehož výstupem je výsledná koncentrace Ca^{2+} iontů ve svalu, je sestaven z několika bloků tak, aby byly dodrženy základní poznatky z fyziologie. Je zde využito několika časových zpoždění a poklesů, které kopírují změny v koncentraci iontů mezi jednotlivými impulsy.



Obrázek 4-3: Odkrytý subsystém představující průběh koncentrace Ca^{2+} iontů.

1 – Parametr st určuje velikost skokové změny koncentrace iontů, která simuluje jednotlivé pulsy. Jeho hodnota je $1 \cdot 10^{-5}$ [mol/l]. Jak vyplývá z Hillova modelu, výše této koncentrace má přímý vliv na velikost síly, produkované kontraktilní komponentou svalu.

2 – Tento blok reprezentuje fakt, že po vypuzení iontů do sarkoplazmy dochází k jejich okamžitému návratu do sarkoplazmatického retikula. TCa představuje časovou konstantu tohoto návratu, její velikost je 0,01. Hodnota této konstanty má tak vliv na rychlost poklesu koncentrace Ca^{2+} iontů ve svalu.

3 – Jedná se o blok, představující časové zpoždění definované jako $T \cdot (N - 1)$, kde:

- T = perioda impulsu, tj. doba trvání odpovědi na jedno nervové podráždění
- N = počet impulsů

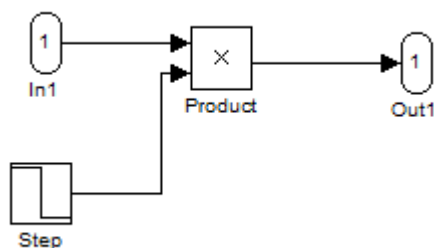
4 – Funkce, která určuje okamžik dalšího vzestupu koncentrace iontů v závislosti na následujícím vzruchu.

$$u[1] \cdot \left(u[1] > st \cdot \left(\exp \left(-\frac{T}{TCa} \right) \right) \right) \cdot (N > 1) \quad (4.1-1)$$

- u = vstup
- st = velikost skokové změny koncentrace Ca^{2+} iontů
- T = perioda jednoho impulsu
- TCa = časová konstanta návratu Ca^{2+} iontů do sarkoplazmatického retikula

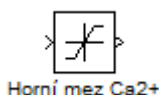
5 – Blok představuje časové zpoždění příchodu dalšího impulsu o hodnotě rovné době trvání jednoho impulsu, tj. periodě T .

6 – Pod tímto blokem je skryto následující schéma:



Toto schéma slouží k úpravě periody a tím ke stabilizaci celého průběhu koncentrace Ca^{2+} iontů.

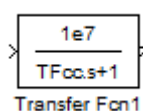
Celková koncentrace Ca^{2+} iontů ještě před příchodem na vstup bloku pro sílu, generovanou kontraktilním aparátem svalu, prochází blokem určujícím horní hranici vlivu těchto iontů.



Tento blok vyjadřuje fakt, že určité nadprahové množství Ca^{2+} iontů již nemá vliv na svalovou sílu. Horní mez je zde nastavena jako $4 \cdot 10^{-6}$ [mol/l].

4.2 Síla generovaná kontraktilním aparátem svalu

Jedná se o sílu danou pouze aktivní činností sarkomery (interakcí kontraktilních bílkovin aktinu a myozinu), bez jakékoli odporové síly pramenící z pasivní elastické komponenty svalu.

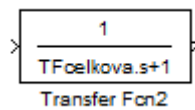


Vstupem tohoto bloku je koncentrace Ca^{2+} iontů. Pro modelaci systému, generující sílu, blok využívá Laplaceova přenosu.

- 1e7 – tato konstanta upravuje velikost modelované síly
- TFcc – časová konstanta náběhu síly definovaná jako $1 \cdot 10^{-3}$

4.3 Celková síla svalu

Celková síla je definována jako suma aktivní síly, generované činností aktinu a myozinu, a pasivní síly dané elastickými vlastnostmi titinu a pojivových tkání svalu.

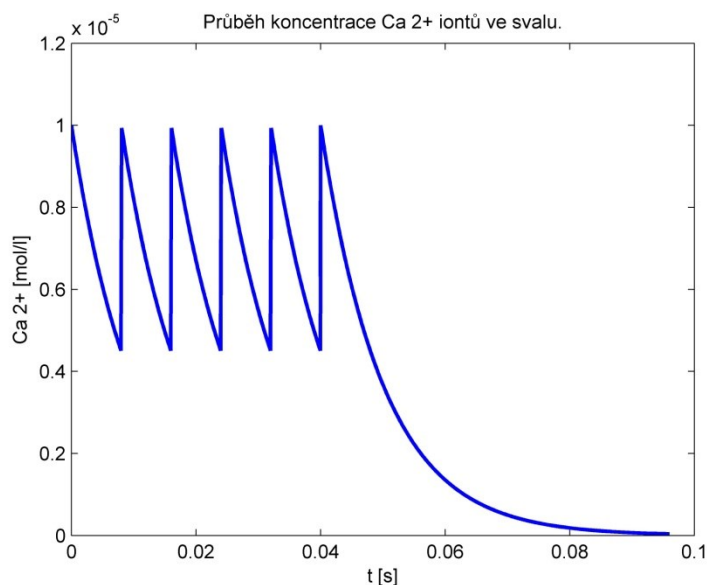


Jedná se o stejný typ bloku, kterého je využito pro získání síly generované kontraktilním aparátem. Vstupem je zde právě ona síla, jejíž průběh tak ovlivňuje i průběh síly celkové.

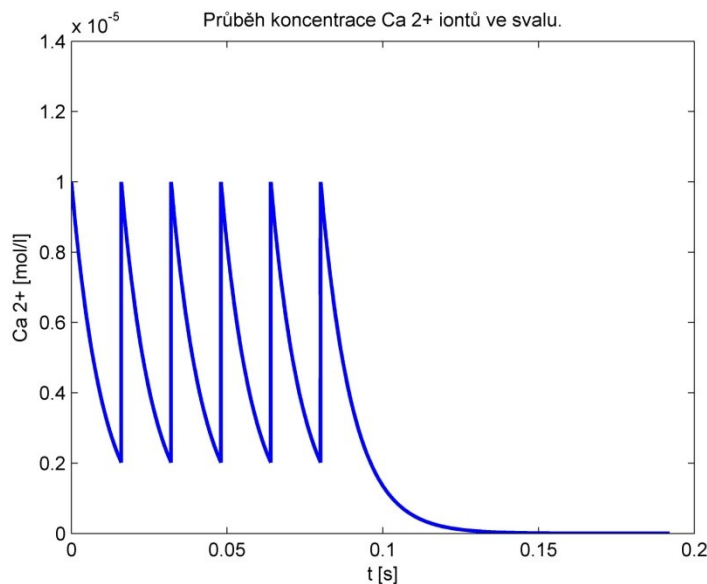
- $TF_{celkova}$ = časová konstanta náběhu síly, její hodnota činí $1,5 \cdot 10^{-2}$

5 Výsledky SW modelu kosterního svalu

Jak vyplývá z předchozí kapitoly, výsledky simulace jsou interpretovány pomocí několika grafů. Jedná se o průběh koncentrace Ca^{2+} iontů, průběh aktivní síly a nakonec průběh síly celkové.



Obrázek 5-1: Průběh koncentrace Ca^{2+} iontů ve svalu.

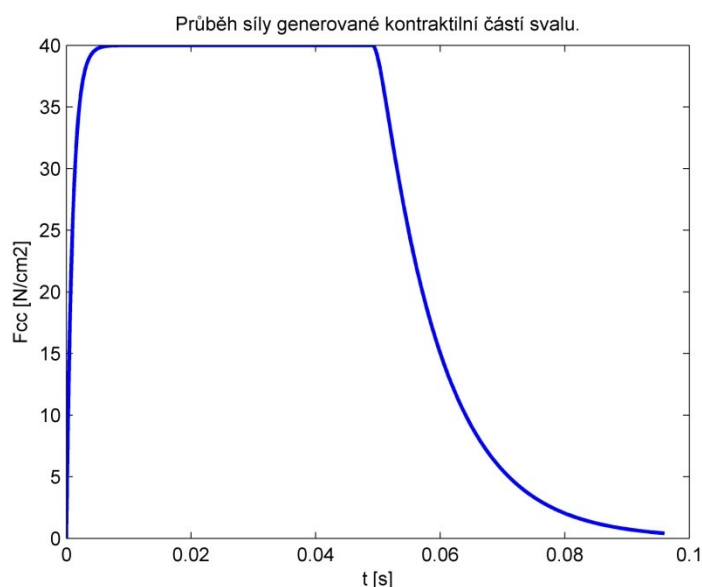


Obrázek 5-2: Průběh koncentrace Ca^{2+} iontů ve svalu.

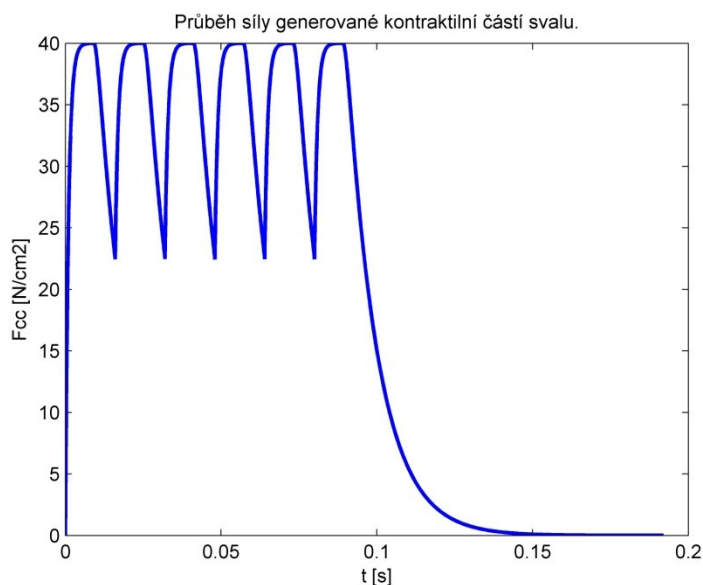
V průběhu koncentrace Ca^{2+} iontů si lze jasně všimnout šesti vrcholů. Tyto vrcholy reprezentují jednotlivé impulsy, přicházející z centrální nervové soustavy a jsou určeny

parametrem st (viz. Kapitola 4). Jednotlivé poklesy mezi nimi jsou dány okamžitým návratem Ca^{2+} iontů do sarkoplazmatického retikula tak, jak je popsáno ve fyziologii.

Zatímco průběh na obrázku 5-1 je výsledkem simulace s periodou $T = 0,008 \text{ s}$ a mezi jednotlivými vzruchy dochází k poklesu koncentrace Ca^{2+} iontů na hodnotu zhruba $0,45 \cdot 10^{-5} \text{ mol/l}$, obrázek 5-2 ukazuje průběh s periodou $T = 0,016 \text{ s}$. Při takovémto nastavení periody mají tedy vápníkové ionty dvakrát delší čas na návrat do sarkoplazmatického retikula, čímž mezi jednotlivými impulsy dochází k větším poklesům jejich koncentrace, až na $0,2 \cdot 10^{-5} \text{ mol/l}$, ve svalu.



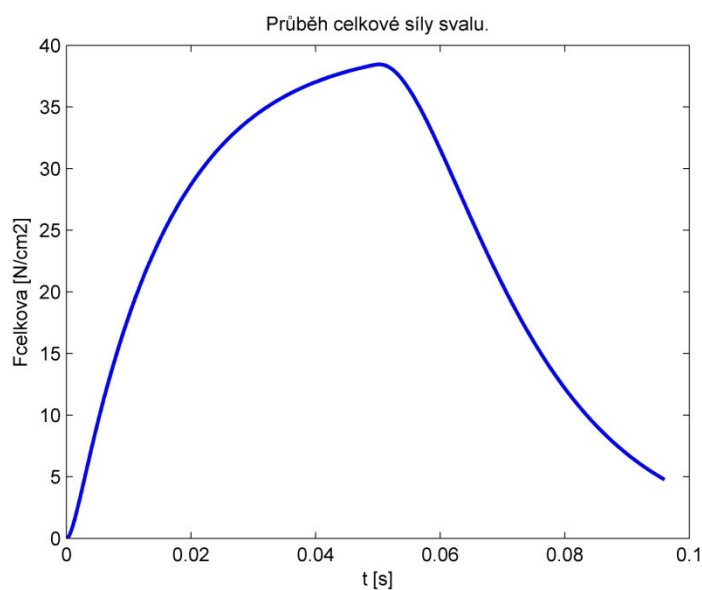
Obrázek 5-3: Průběh síly generované kontraktilní komponentou svalu.



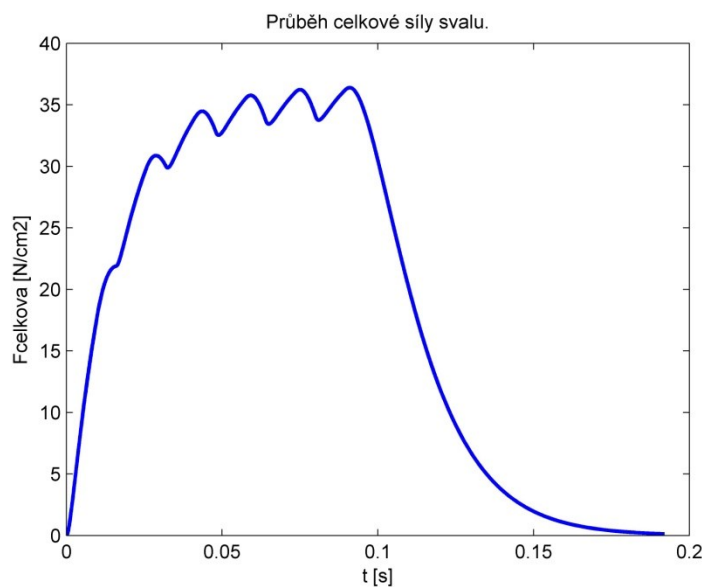
Obrázek 5-4: Průběh síly generované kontraktilní komponentou svalu.

Obrázky 5-3 a 5-4 ukazují průběh aktivní síly, generované kontraktilní komponentou svalu. Jelikož má koncentrace vápníkových iontů přímý vliv na průběh této síly, promítá se nastavení periody i do tohoto výstupu modelu.

Průběh na obrázku 5-3 pochází ze simulace s nastavením periody $T = 0,008 \text{ s}$ a protože zde nedochází k žádnému poklesu síly, vykazuje hladký tetanus. Na obrázku 5-4 jsou zřetelně viditelné poklesy síly mezi jednotlivými vzruchy. To je dáno delším trváním jednotlivých impulsů ($T = 0,016 \text{ s}$) a větším poklesem koncentrace vápníkových iontů. Průběh na obrázku 5-4 má tak charakter vlnitého tetanu.



Obrázek 5-5: Průběh celkové síly svalu.



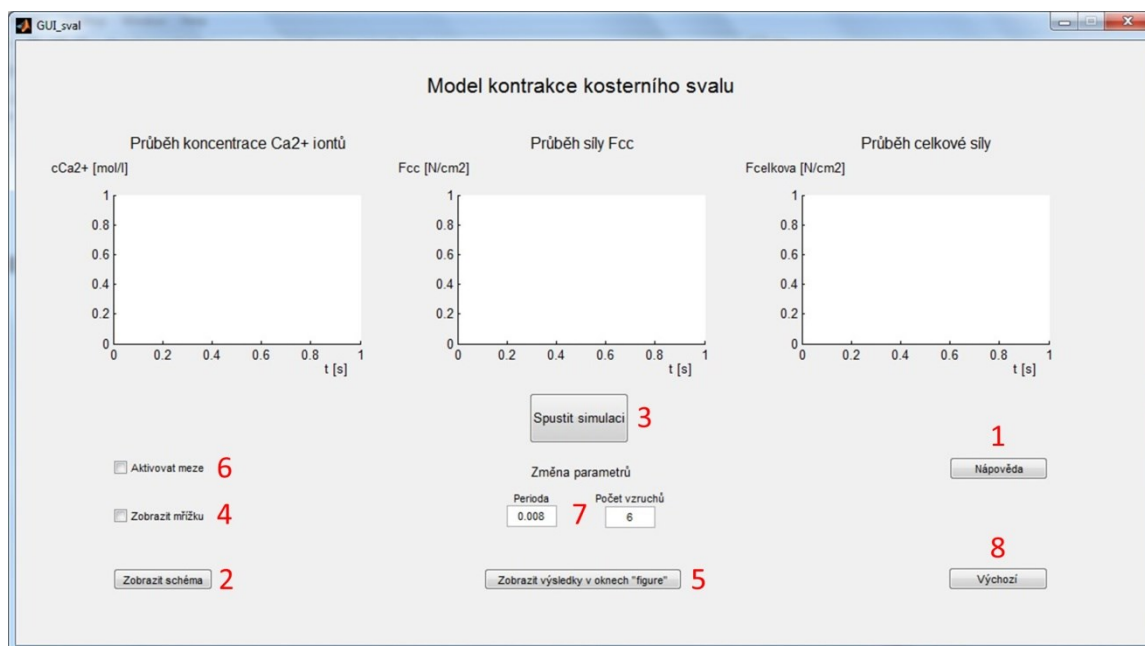
Obrázek 5-6: Průběh celkové síly svalu.

Situace na obrázcích 5-5 a 5-6 zobrazuje průběhy celkové síly svalu, která závisí na síle aktivní a tím samozřejmě i na koncentraci vápníkových iontů. Opět se zde tedy uplatňuje vliv periody. Stejně jako v předchozím srovnání – průběh na obrázku 5-5, s nastavením periody $T = 0,008\text{ s}$, odpovídá hladkému tetanu a průběh na obrázku 5-6, který je výsledkem simulace s periodou nastavenou jako $T = 0,016\text{ s}$, tetanu vlnitému.

6 Návrh uživatelského rozhraní

Uživatelské rozhraní pro práci s modelem je realizováno pomocí nástroje GUI v prostředí programu Matlab. Je zde několik funkčních prvků, které výrazně usnadňují orientaci v modelu i uživateli nepřilíživě zasvěcenému do problematiky.

Grafické uživatelské rozhraní je složeno ze sedmi tlačítek a dvou textových polí, která uživateli umožňují měnit periodu a počet jednotlivých vzruchů. Dále jsou zde tři předpřipravená okna pro zobrazení výsledků simulace.

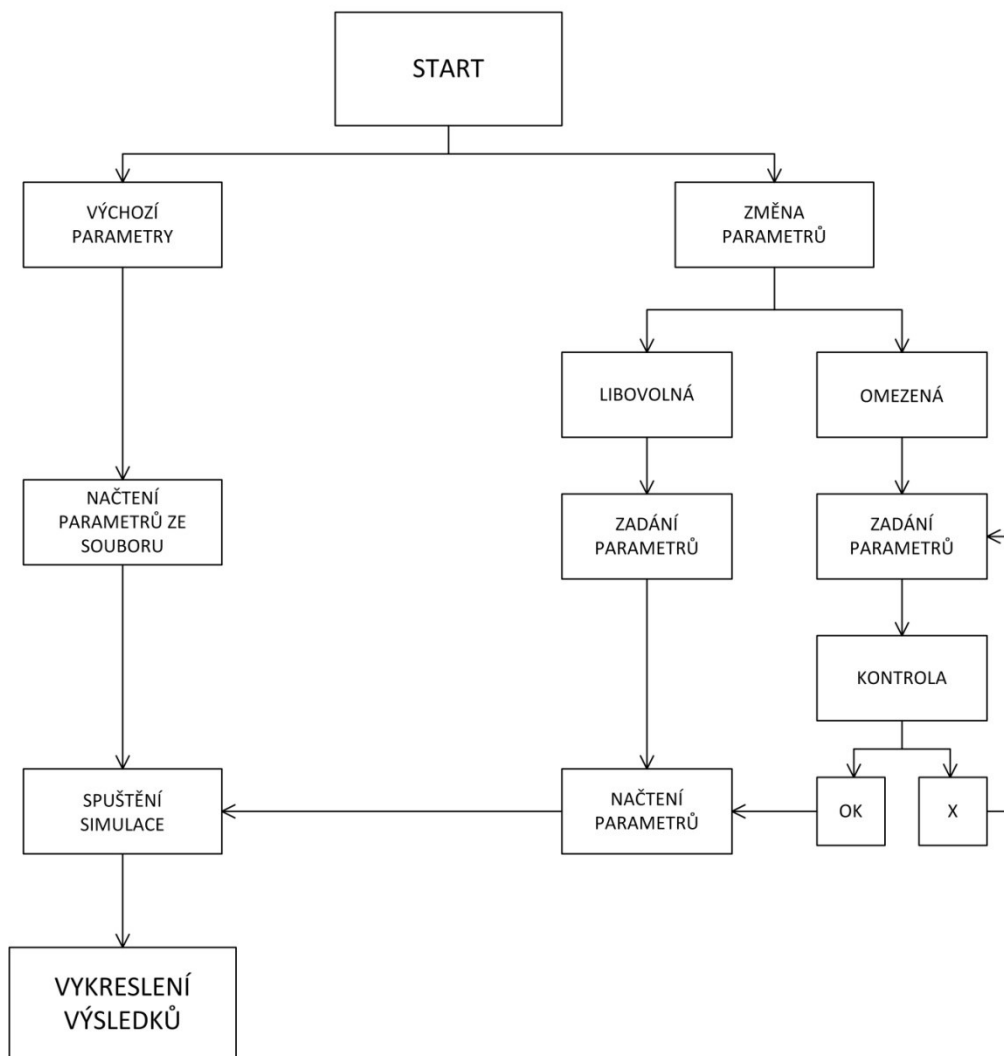


Obrázek 6-1: Grafické uživatelské rozhraní pro práci s modelem.

1. Tlačítko *Nápověda* – zobrazuje okno s podrobnějším popisem ovládání a práce s modelem.
2. Tlačítko *Zobrazit schéma* – umožňuje zobrazit samotné schéma modelu v Simulinku.
3. Tlačítko *Spustit simulaci* – umožňuje zobrazit výsledky simulace do připravených oken.
4. Tlačítko *Zobrazit mřížku* – jeho zatržením lze zobrazit mřížku v jednotlivých oknech.
5. Tlačítko *Zobrazit výsledky v oknech „figure“* – po spuštění simulace umožňuje zobrazit výsledky i do samostatných oken typu *figure*, což je výhodné zejména pro jejich uložení.
6. Tlačítko *Aktivovat meze* – jeho zatržením aktivujeme omezení pro hodnotu zadávané periody a počtu vzruchů. Tím je zamezeno riziko zobrazování průběhů, které jsou nepřehledné nebo nemají charakter kontrakce v pravém slova smyslu.
7. Textová pole pro změnu parametrů – slouží pro nastavení hodnoty periody nebo počtu vzruchů dle vlastních preferencí uživatele.

8. Tlačítko *Výchozí* – zajišťuje obnovu všech parametrů do původních, autorem nastavených, hodnot.

SPUSTIT SIMULACI



6-2: Vývojový diagram tlačítka *Spustit simulaci*.

Na obrázku 6-2 je formou vývojového diagramů stručně znázorněna funkce tlačítka *Spustit simulaci*. Jednotlivé bloky představují fáze programu, které jsou podrobněji popsány v následujícím textu.

Načtení parametrů ze souboru

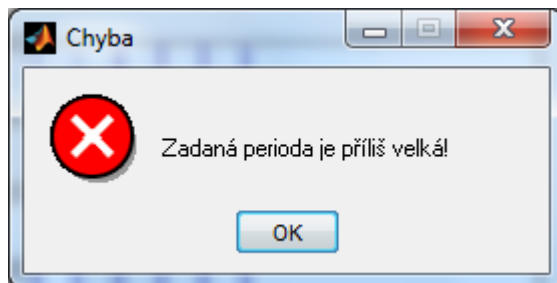
Tento krok spočívá ve skrytém otevření souboru s příponou *. *mdl* a v současném načtení parametrů, potřebných pro simulaci, ze souboru s příponou *. *m*. Toto načtení parametrů je realizováno prostřednictvím funkce *PreLoadFcn*, která je k dispozici přímo v nabídce samotného Simulinku (*File→Model properties→Callbacks*).

Libovolná změna parametrů

Pomocí textových polí je uživateli umožněno zadávat hodnotu periody a počet vzruchů bez jakéhokoli omezení. Hrozí zde však riziko zobrazování nesprávných nebo nečitelných výsledků (viz. Kapitola 7). Tato volba parametrů je možná pouze v případě, kdy není zatrženo tlačítko *Aktivovat meze* (obrázek 6-1, tlačítko 6).

Omezená změna parametrů

Jedná se o kontrolu uživatelem zadaných hodnot. Tato kontrola je aktivní v případě, kdy je zatrženo tlačítko *Aktivovat meze*. Jestliže uživatel zadá hodnoty, které jsou mimo definovaný rozsah (viz. Kapitola 7), bude na tuto skutečnost upozorněn vyskakovacím oknem a simulace nebude provedena. Upozornění uživatele na špatně zvolenou hodnotu periody při aktivní kontrole je zobrazeno na obrázku 6-3.



6-3: Upozornění.

Načtení parametrů

K načtení parametrů dochází po zadání správných, při libovolné změně jakýchkoliv, hodnot periody a počtu impulsů do textových polí. Tento proces je započat přečtením zadaných hodnot a jejich převodem z proměnné typu *string* na proměnnou typu *double*. Následuje změna původních hodnot v jednotlivých blocích souboru *. *mdl*. Konkrétněji, dochází zde k uložení proměnné typu *double*, získané z předchozího kroku, na danou pozici v bloku namísto původní hodnoty dle přesně specifikované cesty.

Ostatní, neměnné, parametry jsou opět načteny prostřednictvím funkce *PreLoadFcn* ze souboru s příponou *. *m* při skrytém otevření modelu.

Spuštění simulace

Jedná se o spuštění souboru *. *mdl* pomocí příkazu *sim* ('*'). Výsledky simulace jsou poté díky použití bloků *ToWorkspace* automaticky exportovány do *workspace* matlabu.

Na obrázku 6-4 jsou červeně zaznačeny výsledky simulace, uloženy jako struktura s časem. Tento export je ve *workspace* viditelný pouze při manuálním spuštění souboru *. *mdl*, nikoli při jeho spuštění prostřednictvím GUI.

Name	Value
Ca	<1x1 struct>
Ca2max	4.0000e-06
N	6
T	0.0080
TCa	0.0100
TFcc	1.0000e-03
TFcelkova	0.0150
sila	<1x1 struct>
silacelkova	<1x1 struct>
st	1.0000e-05
tout	<1000x1 double>

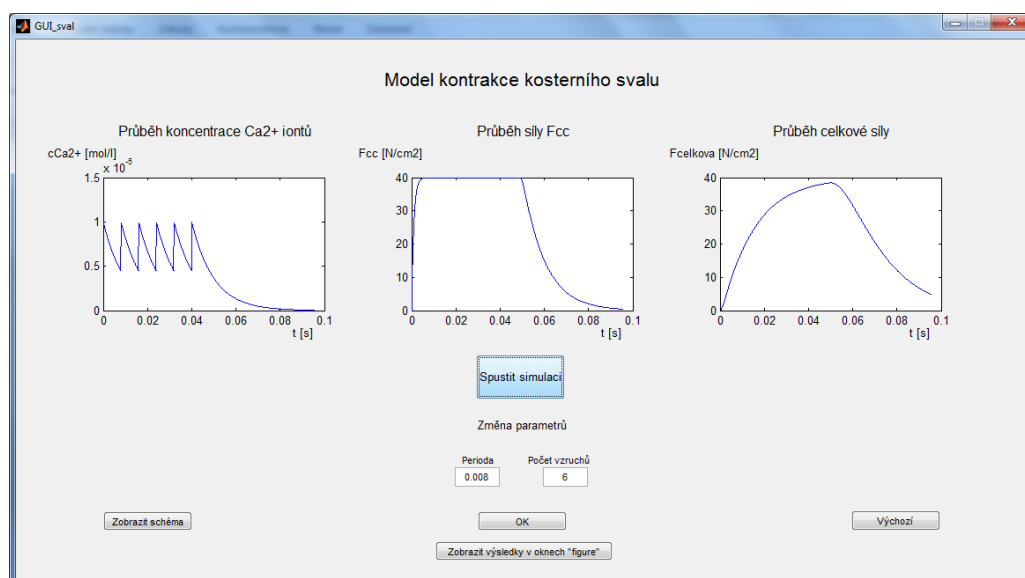
6-4: Export výsledků simulace do *workspace*.

Vykreslení výsledků simulace do grafů

Výsledky simulace jsou z *workspace* vykresleny do připravených, v případě použití tlačítka *Zobrazit výsledky v oknech „figure“* do samostatných, oken.

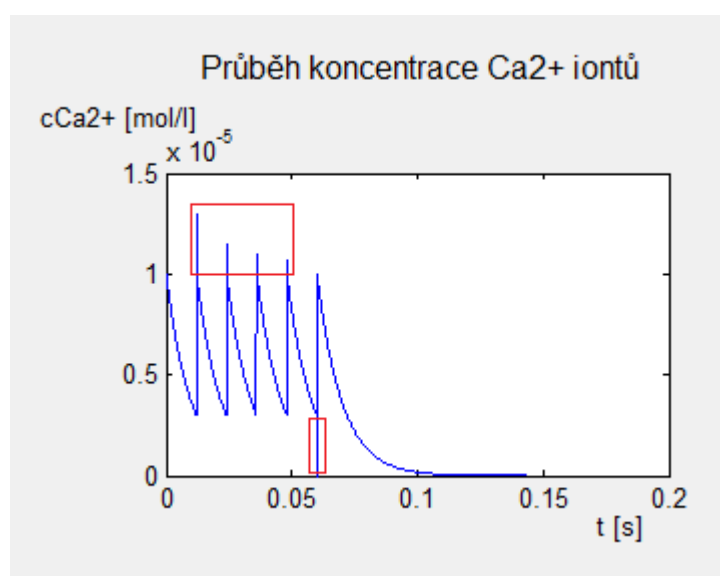
7 Ověření funkčnosti modelu

Funkčnost modelu byla ověřena pro různá nastavení parametrů. Při rozumně volených parametrech nebyly zjištěny žádné větší anomálie nebo chyby. Jediným problémem je chyba ve vykreslení průběhu vápníkových iontů při jiné než výchozí hodnotě periody (obrázek 7-2). Tato chyba však nemá nic společného s konstrukcí modelu. Jedná se o chybu samotného softwaru MATLAB/Simulink.



7-1: Výsledky simulace, zobrazené v okně GUI.

Obrázek 7-1 ukazuje výsledky simulace při výchozím nastavení parametrů.

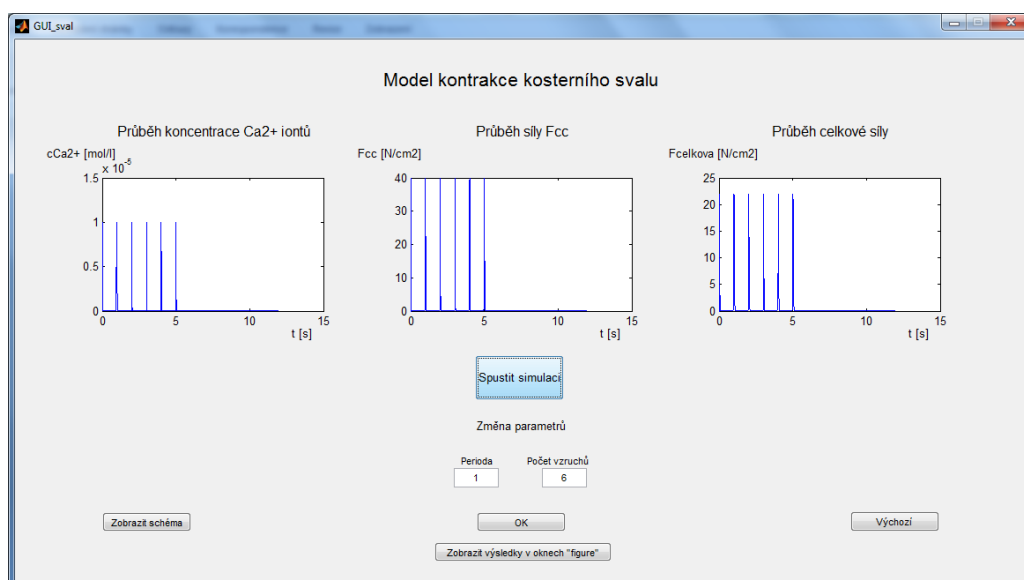


7-2: Ukázka chyby při interpretaci jednoho z výsledků simulace.

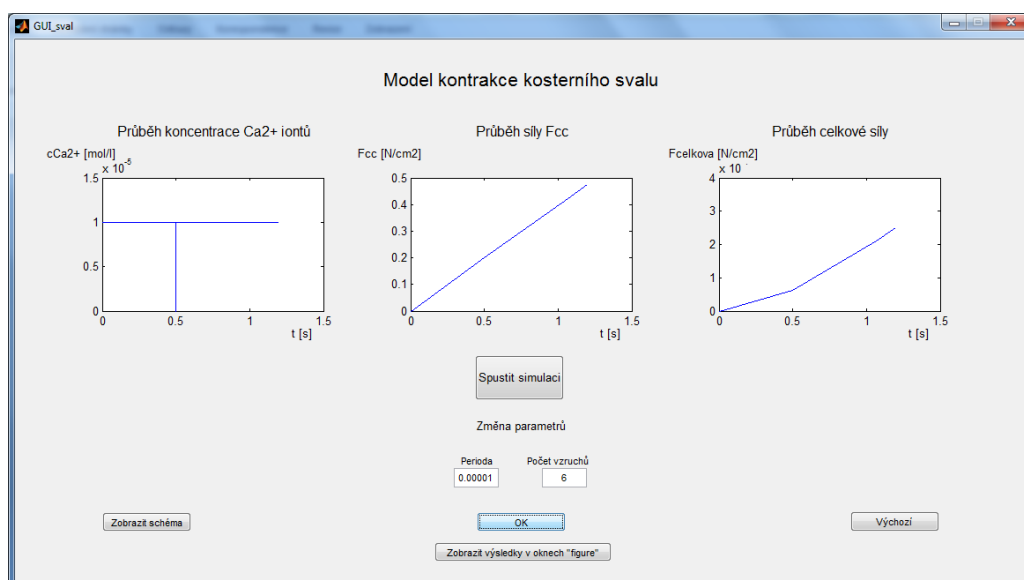
Červené obdélníky v obrázku 7-2 upozorňují na chyby softwarového původu při jiném nastavení periody.

7.1 Extrémní případy modelu

Špatná volba hodnot některých parametrů s sebou přináší komplikace v podobě špatně čitelných nebo zcela nevyhodnotitelných průběhů.



7-3: Extrémní případ výsledků simulace.

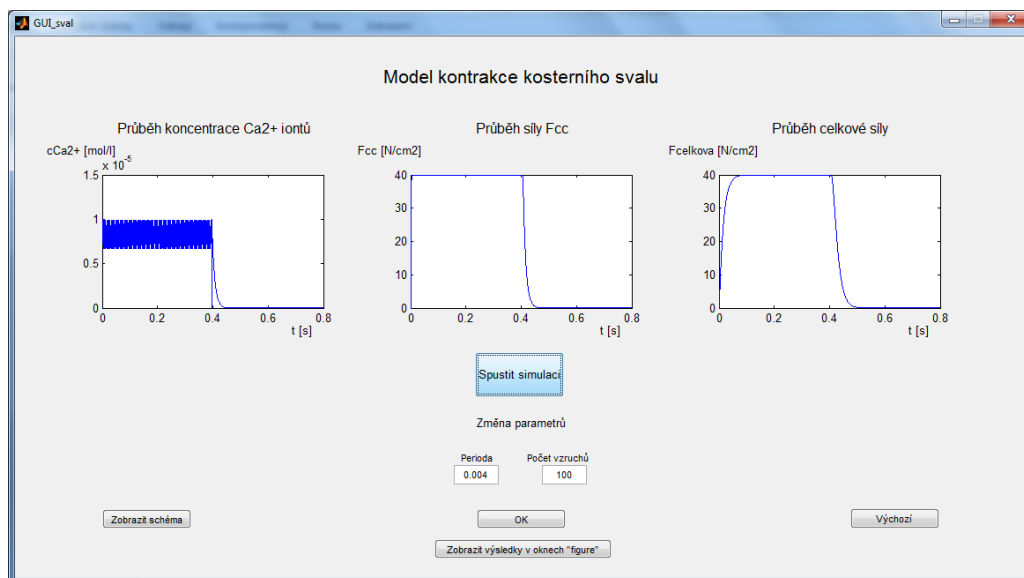


7-4: Extrémní případ výsledků simulace.

Obrázky 7-3 a 7-4 jsou důkazem následků špatně zvolené hodnoty periody. Průběhy na obrázku 7-3 vznikly ze simulace s příliš velkou periodou ($T = 1$ s). Průběhy na obrázku 7-4 jsou

naopak výsledkem simulace s příliš malou hodnotou periody ($T = 0,000001$ s). Oba výsledky jsou naprosto nevyhodnotitelné.

Z výše uvedeného důvodu je zadávání hodnoty periody omezeno pouze na interval od 0,004 do 0,04. Tyto meze jsou zcela dostačující pro sledování vlivu periody na jednotlivé průběhy a zároveň je zachovávají v požadované podobě.



7-5: Extrémní případ výsledků simulace.

Počet vzruchů samozřejmě nemá vliv na formu jednotlivých průběhů. V rámci čitelnosti průběhu koncentrace vápníkových iontů je však omezen na interval 1 až 10. Na obrázku 7-5 lze pozorovat výsledky simulace sta vzruchů ($N = 100$).

8 Závěr

Hlavním bodem zadání této bakalářské práce bylo realizovat softwarový model kontrakce kosterního svalu spolu s funkčním uživatelským rozhraním.

Pro tento účel bylo využito Simulinku, z prostředí programu Matlab, jehož struktura umožňuje efektivní modelování biologických systémů prostřednictvím lineárních bloků. Grafické uživatelské rozhraní bylo vytvořeno pomocí GUI editoru, kterým rovněž disponuje program Matlab. Model byl zkonstruován na základě dosavadních poznatků z fyziologie kosterního svalstva. Podkladem pro jeho vytvoření byly rovněž dřívější návrhy autorů zabývajících se touto problematikou, zejména pak kniha Biokybernetika [6].

Správnost výsledných průběhů modelu byla ověřena porovnáním s výsledky jiných modelů, souvisejících s touto tematikou, uvedenými v odborné literatuře. Dále byly experimentálním způsobem zjištěny meze volitelných parametrů tak, aby model neprodukoval nesprávné výsledky. Jedinou chybou modelu jsou překmity v průběhu koncentrace vápníkových iontů při jiné, než výchozí hodnotě periody. Tato chyba je však způsobena samotným programem a nebylo možno ji žádným vhodnějším nastavením odstranit.

Součástí této práce je i laboratorní úloha, která spočívá v různém nastavování parametrů modelu pomocí uživatelského rozhraní a sledování jejich vlivu na výsledné průběhy.

V současnosti je model generátorem pouze výsledků izometrické kontrakce. V budoucnu by jej bylo možno doplnit i o kontrakci izotonickou, tzn. modelovat dynamiku zkracování svalu v závislosti na velikosti zátěže.

9 Použité zdroje

- [1] JIRÁK, Zdeněk. *Fyziologie pro bakalářské studium na ZSF OU*. 2., přeprac. vyd. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, Zdravotně sociální fakulta, 2007, 249 s. ISBN 978-80-7368-234-7.
- [2] TROJAN, Stanislav. *Lékařská fyziologie*. 4. vyd. přepr. a dopl. Praha: Grada Publishing, 2003, 771 s. ISBN 80-247-0512-5.
- [3] SILBERNAGL, Stefan a Agamemnon DESPOPOULOS. *Atlas fyziologie člověka*. 6. přeprac. a rozš. vyd. Praha: Grada, 2004, XII, 435 s. ISBN 80-247-0630-X.
- [4] KEENER, James P a James SNEYD. *Mathematical physiology: with 360 illustrations*. New York: Springer, c1998, xix, 766 s. Interdisciplinary applied mathematics. ISBN 0-380-98381-3.
- [5] WIJK VAN BRIEVINGH, R a Dietmar MÖLLER. *Biomedical modeling and simulation on a PC: a workbench for physiology and biomedical engineering*. New York: Springer-Verlag, c1993, xvi, 517 p. ISBN 35-409-7650-7.
- [6] ECK, Vladimír a Miroslav RAZÍM. *Biokybernetika*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, Elektrotechnická fakulta, 1996, 155 s.
- [7] Muscle Tissues. *21C Frontier Bioscience* [online]. © 1998-2012 [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://www.nvo.com/jin/homepage8/>
- [8] The Muscular System. *Midlands Technical College* [online]. © 2012 [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://classes.midlandstech.edu/carterp/Courses/bio110/chap07/chap07.html>
- [9] Overview of Muscle Tissues. *Midlands Technical College* [online]. © 2012 [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://classes.midlandstech.edu/carterp/Courses/bio210/chap09/lecture1.html>

10 Obsah přiloženého CD

- Bakalářská práce ve formátu .pdf a .docx
- Zadání laboratorní úlohy v českém i anglickém jazyce
- Vzorový protokol
- Softwarový model kontrakce kosterního svalu – celkem 5 souborů

11 Seznam příloh

- A. Laboratorní úloha v českém jazyce
- B. Laboratorní úloha v anglickém jazyce
- C. Vzorový protokol

1 Kontrakce kosterního svalu

1.1 Cíl úlohy

Cílem této úlohy je seznámit studenty s modelem kontrakce kosterního svalu.

1.2 Zadání

1. Seznamte se s ovládáním a konstrukcí modelu kontrakce kosterního svalu.
2. Zjistěte vliv velikosti periody na svalové průběhy.
3. Zjistěte, při jaké hodnotě periody již nedojde k vybavení kontrakce.

1.3 Použité vybavení

- PC se softwarem Matlab

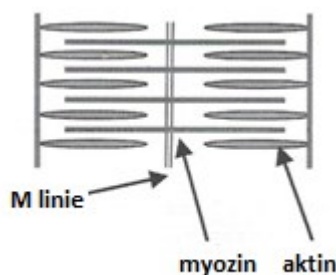
1.4 Teoretický rozbor

1.4.1 Fyziologický základ

Struktura svalu

Základní stavební jednotkou příčně pruhovaného svalu je svalové vlákno. Podjednotkou svalového vlákna je myofibrila. Myofibrily jsou dále děleny na úseky zvané sarkomery. Právě sarkomera představuje základní funkční uspořádání pro schopnost svalu kontrahovat se.

Sarkomery jsou od sebe navzájem odděleny tzv. Z-disky. Kolmo ve struktuře Z-disku jsou na obou stranách ukotvena **aktinová** (tenká) filamenta. Mezi nimi jsou uložena **myozinová** (tlustá) filamenta tak, že se oba typy filament částečně překrývají. Myozinová filamenta jsou navíc napříč jejich středy spojena bílkovinnou strukturou, označovanou jako M-linie.



Obrázek 1-1: Sarkomera.

Činnost svalu

Základem pro vznik svalové kontrakce je excitace. V zásadě se jedná o podráždění svalu prostřednictvím vzruchu z CNS, na které sval odpoví kontrakcí.

A. Laboratorní úloha v českém jazyce

Axony motoneuronů vytvářejí spolu se sarkolemou svalového vlákna tzv. nervosvalové ploténky. Jde o struktury, které umožňují přenos vzruchu na sval. Tento přenos způsobí uvolnění acetylcholinu, který působí na acetylcholinové receptory nikotinového typu na sarkolemě, řídící kanály pro Na^+ . Dochází k průniku Na^+ iontů do sarkoplazmy a tím k místní depolarizaci. V případě, že tato depolarizace dosahuje prahové hodnoty, dojde k vybavení akčního potenciálu.

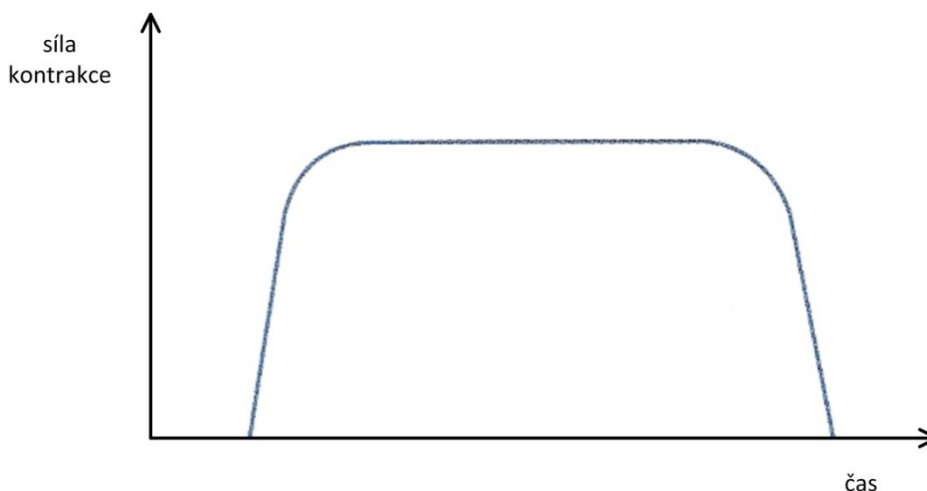
Akční potenciál se dále šíří do nitra svalového vlákna. Tento děj způsobí masivní uvolnění iontů Ca^{2+} do sarkoplazmy, v důsledku čehož dojde k interakci filament aktinu a myozinu nastává štěpení molekuly ATP, uložené v globulární hlavě, a za pomoci uvolněné energie dojde k ohybu hlavy. Tento ohyb způsobí posun myozinu po aktinu, což se projeví zkrácením svalu. V okamžiku, kdy se na globulární hlavu naváže další molekula ATP, spojení se uvolní, hlava se vrací do původní polohy a v případě dalšího podráždění se celý proces opakuje.

Kontrakce může být dvojího typu. Rozlišujeme kontrakci izometrickou a kontrakci izotonickou. Při izometrické kontrakci se mění pouze napětí svalu, ale délka zůstává stejná (statická výdrž). Izotonická kontrakce je naopak provázána změnou délky svalu při konstantním napětí. V drtivé většině fyziologických pohybů se však ani jeden druh kontrakce nevyskytuje v čisté formě a jedná o kombinaci obou typů kontrakcí, kde jeden může výrazně převažovat.

Tetanus

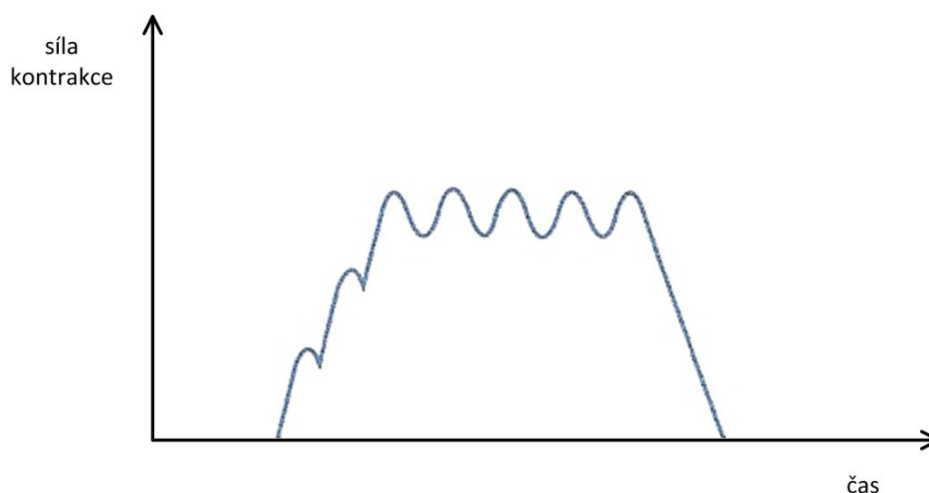
Na jeden akční potenciál reaguje sval jedním šubnutím. Jedno šubnutí však ke vzniku kontrakce nestačí. V případě několika po sobě jdoucích akčních potenciálů, dochází k sumaci a výsledné zkrácení svalu je mnohonásobně větší. Hovoříme o tzv. tetanu.

Rozlišujeme tetanus dvojího typu. Pokud další podráždění nastane až v sestupné části záškubu, hovoříme o tzv. vlnitém tetanu. Jestliže však další vzruch přijde ještě před vrcholem záškubu, nasedá na zbytkovou kontrakci z předchozího šubnutí a výsledná kontrakce je tak daleko intenzivnější. V tomto případě jde o tetanus hladký.



Obrázek 1-2: Hladký tetanus.

A. Laboratorní úloha v českém jazyce

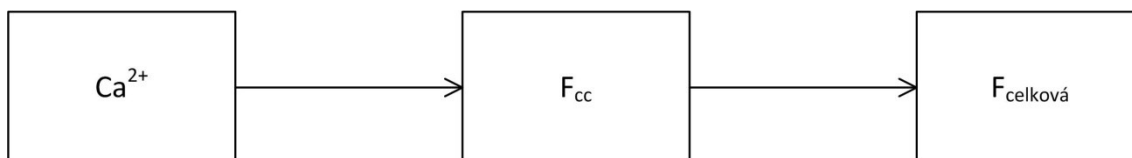


Obrázek 1-3: Vlnitý tetanus.

1.4.2 Model kontrakce

Cílem modelu je interpretovat obecné poznatky z fyziologie kosterního svalstva prostřednictvím grafických ukázek průběhů jednotlivých dějů od vzestupu koncentrace Ca^{2+} až po výstup v podobě celkové síly svalu.

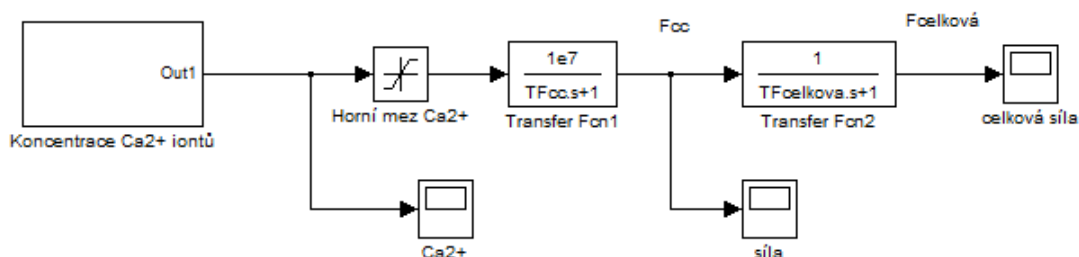
Model je realizován pomocí lineárních bloků v prostředí programu Simulink, bez jakéhokoli pokusu o korespondenci s anatomií. Je složen celkem ze tří částí. První část představuje seskupení bloků, na jehož výstupu je výsledná koncentrace Ca^{2+} iontů ve svalu. Na tento oddíl navazuje blok, který podává informaci o průběhu síly generované kontraktilním aparátem svalu a poslední část reprezentuje celkovou sílu svalu.



Obrázek 1-4: Blokové schéma modelu izometrické kontrakce kosterního svalu.

Jednotlivé části řetězce potom kopíruje seskupení bloků v prostředí Simulinku (Obrázek 1-5).

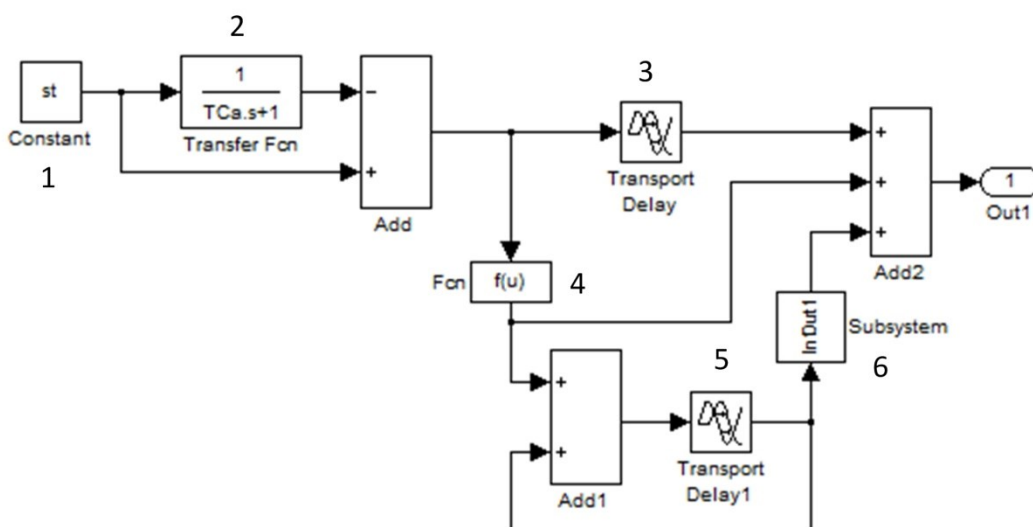
A. Laboratorní úloha v českém jazyce



Obrázek 1-5: Model izometrické kontrakce svalu v prostředí programu Simulink.

Koncentrace Ca^{2+} iontů

Oddíl, jehož výstupem je výsledná koncentrace Ca^{2+} iontů ve svalu, je sestaven z několika bloků tak, aby byly dodrženy základní poznatky z fyziologie. Je zde využito několika časových zpoždění a poklesů, které kopírují změny v koncentraci iontů mezi jednotlivými impulsy.



Obrázek 1-6: Odkrytý subsystém představující průběh koncentrace Ca^{2+} iontů.

1 – Parametr st určuje velikost skokové změny koncentrace iontů, která simuluje jednotlivé pulsy. Jeho hodnota je $1 \cdot 10^{-5}$ [mol/l]. Jak plyne z fyzikální části, výše této koncentrace má přímý vliv na velikost síly, produkované kontraktilní komponentou svalu.

2 – Tento blok reprezentuje fakt, že po vypuzení iontů do sarkoplazmy dochází k jejich okamžitému návratu do sarkoplazmatického retikula. TCa představuje časovou konstantou tohoto návratu, její velikost je 0,01. Hodnota této konstanty má tak vliv na rychlost poklesu koncentrace Ca^{2+} iontů ve svalu.

A. Laboratorní úloha v českém jazyce

3 – Jedná se o blok, představující časové zpoždění definované jako $T \cdot (N - 1)$, kde:

- T = perioda impulsu, tj. doba trvání odpovědi na jedno nervové podráždění
- N = počet impulsů

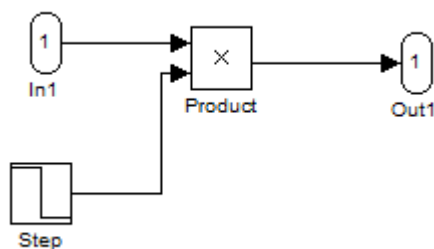
4 – Funkce, která určuje okamžik dalšího vzestupu koncentrace iontů v závislosti na následujícím vzruchu.

$$u[1] \cdot \left(u[1] > st \cdot \left(\exp \left(-\frac{T}{TCa} \right) \right) \right) \cdot (N > 1) \quad (1)$$

- u = vstup
- st = velikost skokové změny koncentrace Ca^{2+} iontů
- T = perioda jednoho impulsu
- TCa = časová konstanta návratu Ca^{2+} iontů do sarkoplazmatického retikula

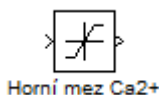
5 – Blok představuje časové zpoždění příchodu dalšího impulsu o hodnotě rovné době trvání jednoho impulsu, tj. periodě T .

6 – Pod tímto blokem je skryto následující schéma:



Toto schéma slouží k úpravě periody a tím ke stabilizaci celého průběhu koncentrace Ca^{2+} iontů.

Celková koncentrace Ca^{2+} iontů ještě před příchodem na vstup bloku pro sílu, generovanou kontraktilním aparátem svalu, prochází blokem určujícím horní hranici vlivu těchto iontů.

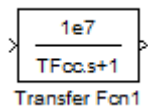


Tento blok vyjadřuje fakt, že určité nadprahové množství Ca^{2+} iontů již nemá vliv na svalovou sílu. Horní mez je zde nastavena jako $4 \cdot 10^{-6}$ [mol/l].

A. Laboratorní úloha v českém jazyce

Síla generovaná kontraktilním aparátem svalu

Jedná se o sílu danou pouze aktivní činností sarkomery (interakcí kontraktilních bílkovin aktinu a myozinu), bez jakékoli odporové síly pramenící z pasivních elastických komponent svalu.

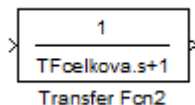


Vstupem tohoto bloku je koncentrace Ca^{2+} iontů. Pro modelaci systému, generující sílu, blok využívá Laplaceova přenosu.

- $1e7$ – tato konstanta upravuje velikost modelované síly
- $TFcc$ – časová konstanta náběhu síly definovaná jako $1 \cdot 10^{-3}$

Celková síla svalu

Celková síla je definována jako suma aktivní síly, generované činností aktinu a myozinu, a pasivní síly dané elastickými vlastnostmi titinu a pojivových tkání svalu.



Jedná se o stejný typ bloku, kterého je využito pro získání síly generované kontraktilním aparátem. Vstupem je zde právě ona síla, jejíž průběh tak ovlivňuje i průběh síly celkové.

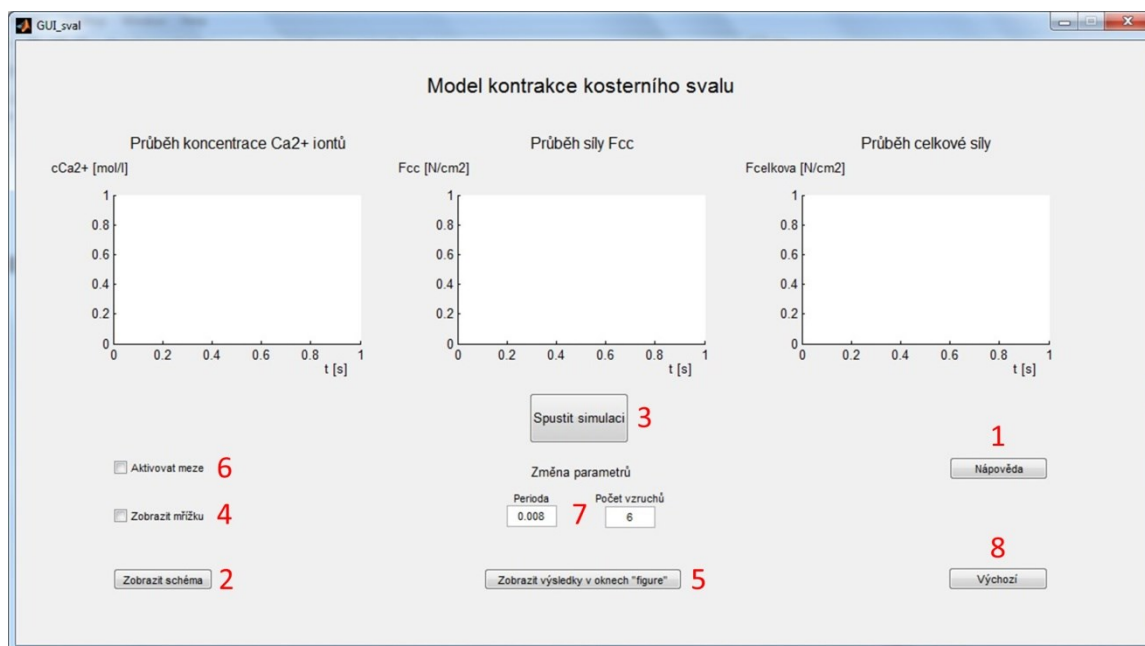
- $TFcelkova$ = časová konstanta náběhu síly, její hodnota činí $1,5 \cdot 10^{-2}$

1.4.3 Uživatelské rozhraní pro práci s modelem

Uživatelské rozhraní pro práci s modelem je realizováno pomocí nástroje GUI v prostředí programu Matlab. Je zde několik funkčních prvků, které výrazně usnadňují orientaci v modelu i uživateli nepříliš zasvěcenému do problematiky.

Grafické uživatelské rozhraní je složeno z celkem sedmi tlačítek a dvou textových polí, která uživateli umožňují měnit periodu a počet jednotlivých vzruchů. Dále jsou zde tři předpřipravená okna pro zobrazení výsledků simulace.

A. Laboratorní úloha v českém jazyce



1-7: GUI pro práci s modelem.

1. Tlačítko *Nápověda* – zobrazuje okno s podrobnějším popisem ovládání a práce s modelem.
2. Tlačítko *Zobrazit schéma* – umožňuje zobrazit samotné schéma modelu v Simulinku.
3. Tlačítko *Spustit simulaci* – umožňuje zobrazit výsledky simulace do připravených oken.
4. Tlačítko *Zobrazit mřížku* – jeho zatržením lze zobrazit mřížku v jednotlivých oknech
5. Tlačítko *Zobrazit výsledky v oknech „figure“* – po spuštění simulace umožňuje zobrazit výsledky i do samostatných oken typu *figure*, což je výhodné zejména pro jejich uložení.
6. Tlačítko *Aktivovat meze* – jeho zatržením aktivujeme omezení pro hodnotu zadávané periody a počtu vzruchů. Tím je zamezeno riziko zobrazování průběhů, které jsou nepřehledné nebo nemají charakter kontrakce v pravém slova smyslu.
7. Textová pole pro změnu parametrů – slouží pro nastavení hodnoty periody nebo počtu vzruchů dle vlastních preferencí uživatele.
8. Tlačítko *Výchozí* – zajišťuje obnovu všech parametrů do původních, autorem nastavených, hodnot.

1.5 Pracovní postup

1.5.1 Pracovní postup k bodu č. 1 zadání:

- Otevřete soubor *sval_GUI.m* a spusťte jej pomocí F5 nebo tlačítka k tomu určenému.
- Seznamte se s prostředím uživatelského rozhraní a vyzkoušejte si funkci všech tlačítek.

A. Laboratorní úloha v českém jazyce

- Otevřete schéma modelu a prostudujte si jednotlivé bloky celého systému tak, abyste pochopili jejich návaznost.

1.5.2 Pracovní postup k bodu č. 2 zadání:

- Zobrazte si jednotlivé průběhy s různým nastavením periody. Simulaci proveďte pro periody o hodnotě 0.008, 0.012 a 0.016.
- Všimněte si, jak se mění jednotlivé průběhy, a klasifikujte druh svalového tetanu.
- Uložte si jednotlivé průběhy, uveďte je do protokolu a řádně je okomentujte.

1.5.3 Pracovní postup k bodu č. 3 zadání:

- Experimentálním způsobem určete takovou hodnotu periody, při které již nedojde ke vzniku kontrakce v pravém slova smyslu.
- Po nalezení této hodnoty si opět uložte jednotlivé průběhy a spolu s řádným komentářem je uveďte do protokolu.

1.6 Kontrolní otázky

1. Který děj předchází kontrakci?
2. Co je vstupem bloku pro simulaci aktivní síly?
3. Jaký je rozdíl mezi aktivní a celkovou silou svalu?
4. Při jaké periodě vykazují silové průběhy hladký tetanus?
5. Při jaké periodě již nedojde k vybavení kontrakce? Proč je tomu tak?

1.7 Seznam doporučené literatury

- [1] SKYPALA, Martin. *Model kosterního svalu*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky. Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství. 2013. 31s. Ing. Martin Augustynek

1 The contraction of skeletal muscle

1.1 Purpose of the task

The main purpose of this task is to apprise students with the model of muscle contraction.

1.2 Task

1. Apprise with control and construction of the model of skeletal muscle.
2. Find out how results of the simulation depend on period.
3. Find out which maximal size of period it is possible to set for generating the real muscle contraction.

1.3 Used equipment

- PC with Matlab software

1.4 Theoretical analysis

1.4.1 Physiology

The structure of muscle

Muscle fiber is the main part of skeletal muscle. Subunit of the muscle fiber is myofibril. Myofibrils are consisted of many small parts known as sarcomeres. These sarcomeres are main functional parts for muscle's ability of contraction.

Sarcomeres are each other separated by so called Z-discs. Upright in Z-disc structure, there are attached thin actin filaments on both of sides. Between them, there are thick myosin filaments. Both of these kinds of filaments are arranged so that they partly overlap. Centres of myosin filaments are moreover connected together by protein structure called M-line.

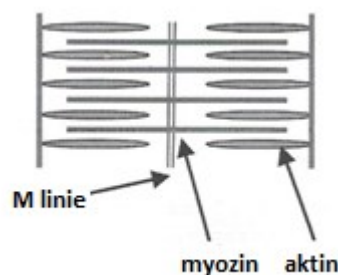


Figure 1-1: Sarcomere.

B. Laboratorní úloha v anglickém jazyce

Muscle activity

Before any contraction it is essential to excite the muscle fiber. This happens due to impulse from central nervous system.

Axons of motoneurons create neuromuscular spindle together with sarcolemma of muscle fiber. This structure enables the transfer of excitation on the muscle. This transfer is responsible for the acetylcholine release that activates acetylcholine receptors connected with sodium channels. Sodium ions then penetrate into sarcolemma. This process causes the depolarization. If this depolarization reaches certain value, action potential will arise.

The action potential is then spread into the centre of muscle fiber. This causes massive release of calcium ions to sarcoplasm. This process will result in actin and myosin interaction. Then the ATP molecule, set in globular head of myosin filament, is cleaved and released energy will cause head to flex. That means decrease in muscle length. When there comes another ATP molecule, connection will be interrupted and head will return back to its initial position. In case of next action potential whole process is repeated.

Basically, we have two kinds of contraction. We have isotonic and isometric contraction. When there is no change in tension but there is change in length, we talk about isotonic contraction. In case of changing tension at constant length we have isometric contraction. In fact, the majority of real-life contraction is a combination of both of these types.

Tetanus

One action potential means one muscle twitch. But one twitch is not enough for the real muscle contraction. In case of coming more action potentials there is summation and total decrease in muscle length is much more intensive. That is what we call tetanus.

In fact, we have two different types of tetanus. If next action potential comes after the peak of twitch, it will be wavy tetanus. The next case is when next action potential will come before the peak of twitch. Then the total contraction will be more intensive and we talk about smooth tetanus.

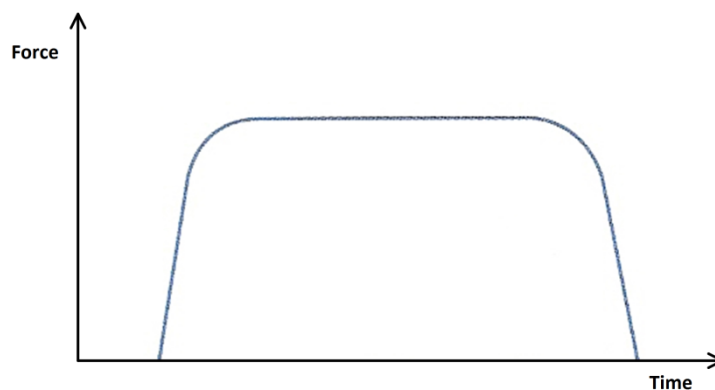


Figure 1-2: Smooth tetanus.

B. Laboratorní úloha v anglickém jazyce

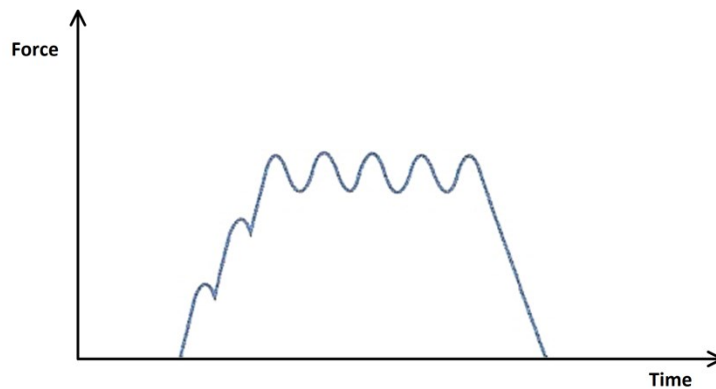


Figure 1-3: Wavy tetanus.

1.4.2 The model of contraction

The aim of this model is an interpretation of general knowledge about physiology of skeletal muscle. It does so by plotting individual processes from raising concentration of calcium ions, to output of total muscle force.

The model is implemented using linear blocks in Simulink software without any effort to correspond with anatomy. It is consisted of three main parts. The first part is created by blocks that give concentration of calcium ions in time as their output. This part is followed by blocks that produce active contractile force. Finally, the last part gives us the total muscle force.

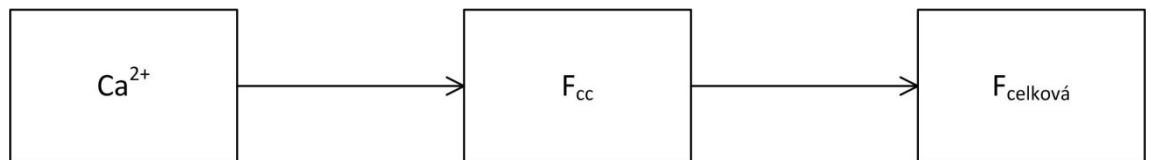


Figure 1-4: Block diagram of the model.

Individual parts of model in Simulink are shown in following picture.

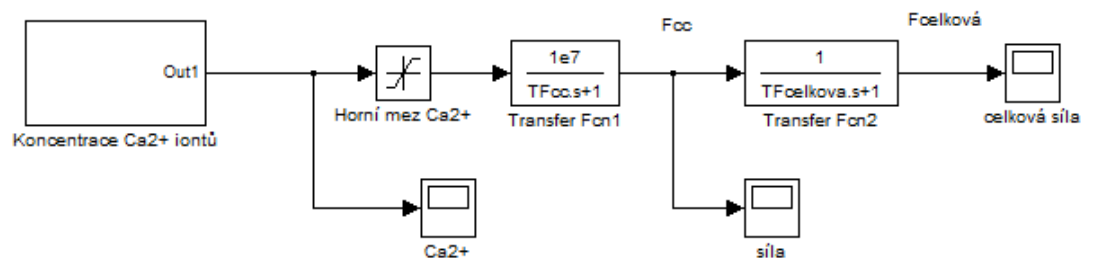


Figure 1-5: Model in Simulink.

B. Laboratorní úloha v anglickém jazyce

Concentration of Ca²⁺ ions

Grouping of blocks, that gives concentration of calcium ions in time, was built in accordance with physiology. There are used some time delays and functions that describe the changes in concentration between individual impulses.

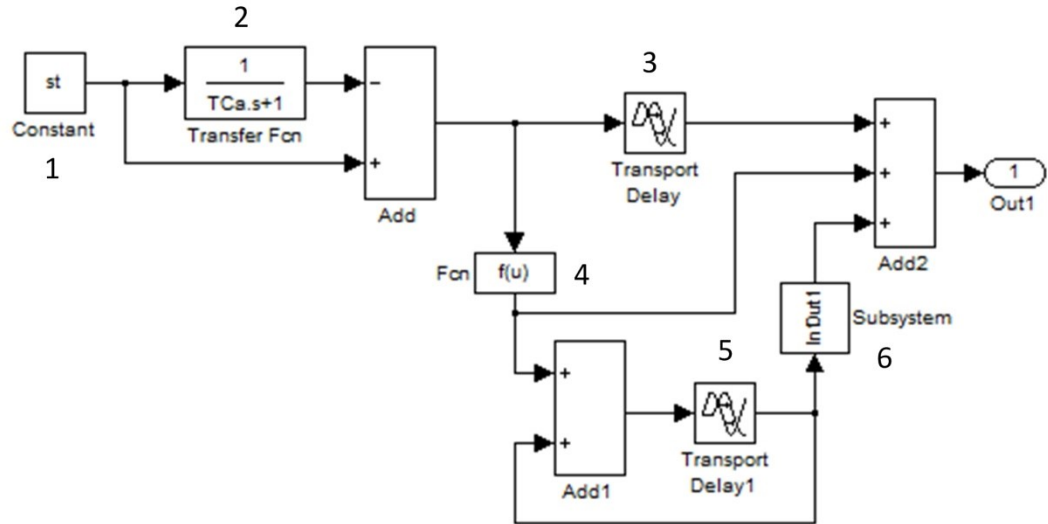


Figure 1-6: Subsystem that generates the concentration of calcium ions.

1 – st is a constant parameter that determines the size of step change in concentration. Its size is defined as $1 \cdot 10^{-5}$ [mol/l]. Muscle forces are absolutely dependent on this value.

2 – This block shows the fact that calcium ions are returned to sarcoplasmic reticulum immediately after their release. TCa represents time constant of this release and its size was defined as 0,01. This constant directly influences the dynamics of decreasing ions concentration in the muscle.

3 – This block represents time delay as $T \cdot (N - 1)$, where:

- T = period of each impulse
- N = number of impulses

4 – Function that determines the moment of increasing concentration of calcium ions depending on the next action potential.

$$u[1] \cdot \left(u[1] > st \cdot \left(\exp \left(-\frac{T}{TCa} \right) \right) \right) \cdot (N > 1) \quad (1)$$

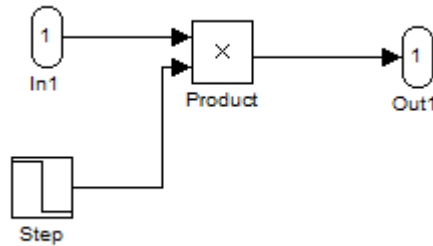
- u = input
- st = size of step change in concentration of calcium ions
- T = period of each impulse

B. Laboratorní úloha v anglickém jazyce

- TCa = time constant of release of ions

5 – This block represents the time delay of coming of the next impulse. This is equivalent to the duration of one impulse.

6 – This subsystem hides the following grouping of blocks:



This grouping is necessary for the stabilization of whole interpretation of ions concentration.

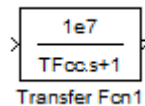
Total concentration of calcium ions has to come through the following block first. Then it continues as input for generating active force.



This block represents that fact that a certain amount of calcium ions does not affect the active force yet. Upper limit is set as $4 \cdot 10^{-6}$ [mol/l].

The active contractile force

This force is produced only by the interaction of actin and myosin filaments without any elastic components.



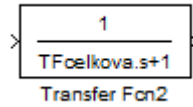
There is used the Laplace transform to getting the active force.

- $1e7$ – constant for regulation the size of active force
- $TFcc$ – time constant defined as $1 \cdot 10^{-3}$

Total muscle force

Total force is a sum of active force and force produced by elastic components and titin filaments.

B. Laboratorní úloha v anglickém jazyce



There is used the same kind of block like in the active force.

- $TF_{celkova}$ = time constant defined as $1,5 \cdot 10^{-2}$

1.4.3 Graphical user interface

This graphical user interface was created for effective use of model. It was built in Matlab, with using GUI tool. There are few functional elements that simplify the orientation in the model.

It consists of five push buttons, two check boxes and two edit texts. These all elements enables user to plot data and change parameters (period and number of impulses). There are also three windows ready for displaying the simulation data.

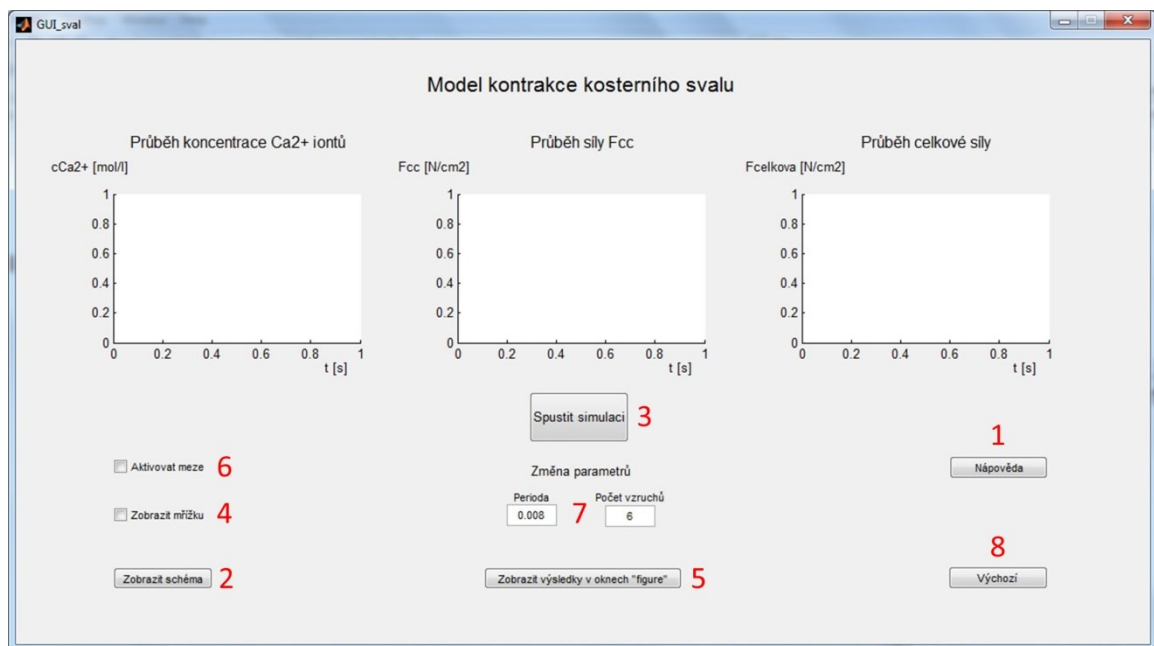


Figure 1-7: Graphical user interface.

1. Push button *Nápověda* – shows help window with more detailed description of working with the model.
2. Push button *Zobrazit schéma* – displays the model in Simulink.
3. Push button *Spustit simulaci* – enables to display results in windows above.
4. Check box *Zobrazit mřížku* – if it is checked, it shows grids.
5. Push button *Zobrazit výsledky v oknech „figure“* – after simulation, it enables to display results in separate *figure* windows.

B. Laboratorní úloha v anglickém jazyce

6. Check box *Aktivovat meze* – if it is checked, it checks the values you set as period or number of impulses. When you set incorrect values the simulation will not start.
7. Edit text for changing parameters – enables to change the value of period and number of impulses.
8. Push button *Výchozí* – it provides default options.

1.5 Instructions

1.5.1 Instructions to task number 1:

- First open the sval_GUI.m file and run it by F5 or by appropriate button.
- Apprise with GUI and try the function of all buttons and other elements.
- Open the model in Simulink and try to understand how whole system works.

1.5.2 Instructions to task number 2:

- Get results for different setting of period. Run simulation for 0.008, 0.012 and 0.016 period.
- Notice how results will change and determine the type of tetanus.
- Save results and mention them in report together with your comments.

1.5.3 Instructions to task number 3:

- Experimentally, determine the maximal value of period that can still make a real contraction.
- After finding that value, save the results and mention them in report together with your comments.

1.6 Questions

1. What action has to become before the contraction?
2. What is the input to block for generating active force?
3. What is the difference between active and total force?
4. Which period of impulses makes the tetanus smooth?
5. What is the maximal value of period that makes a real contraction? Why higher value will not make real contraction?

1.7 Recommended literature

- [1] SKYPALA, Martin. *The model of skeletal muscle*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. Faculty of Electrical Engineering and Computer Science. Department of Cybernetics and Biomedical Engineering. 2013. 31s. Ing. Martin Augustynek

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

VZOROVÝ PROTOKOL

Model kontrakce kosterního svalu

Jméno a příjmení, login

Datum

1 Zadání

1. Seznamte se s ovládáním a konstrukcí modelu kontrakce kosterního svalu.
2. Zjistěte vliv velikosti periody na svalové průběhy.
3. Zjistěte, při jaké hodnotě periody již nedojde k vybavení kontrakce.

2 Použité vybavení

- PC se softwarem Matlab

3 Postup

3.1 Postup k bodu č. 1 zadání

Student doplní vlastními slovy pracovní postup.

3.2 Postup k bodu č. 2 zadání

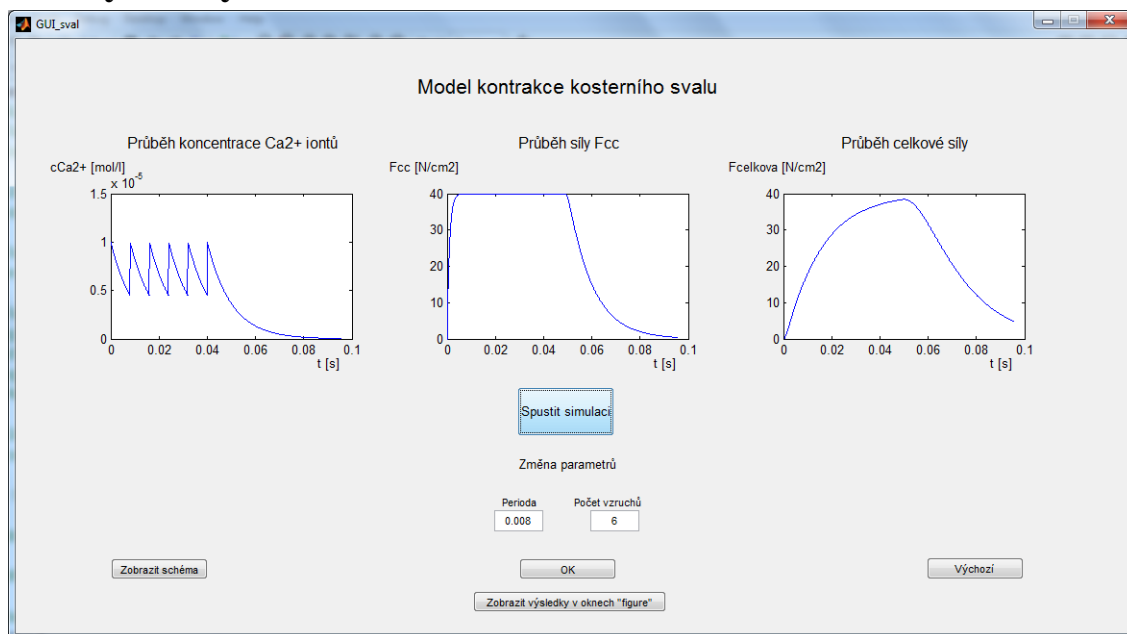
Student doplní vlastními slovy pracovní postup.

3.3 Postup k bodu č. 3 zadání

Student doplní vlastními slovy pracovní postup.

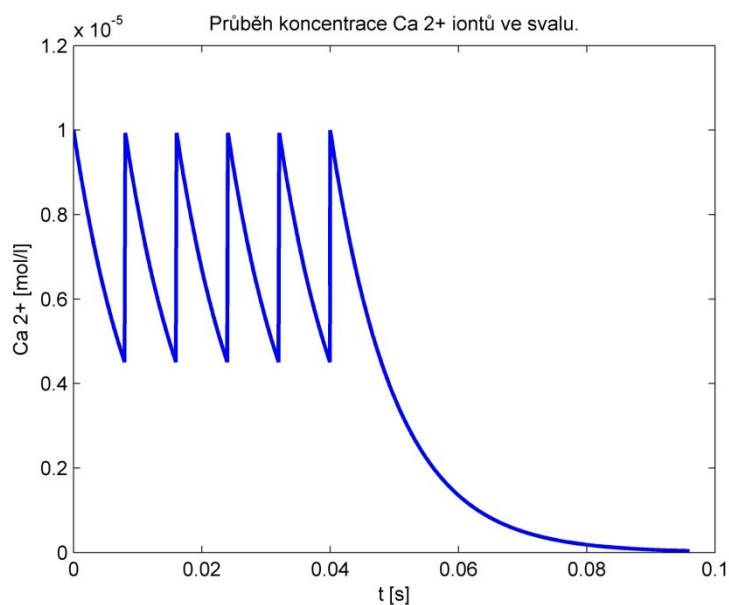
4 Výsledky

4.1 Výsledky k bodu č. 2 zadání



Obrázek 4-1: Spuštěná simulace s výchozími parametry.

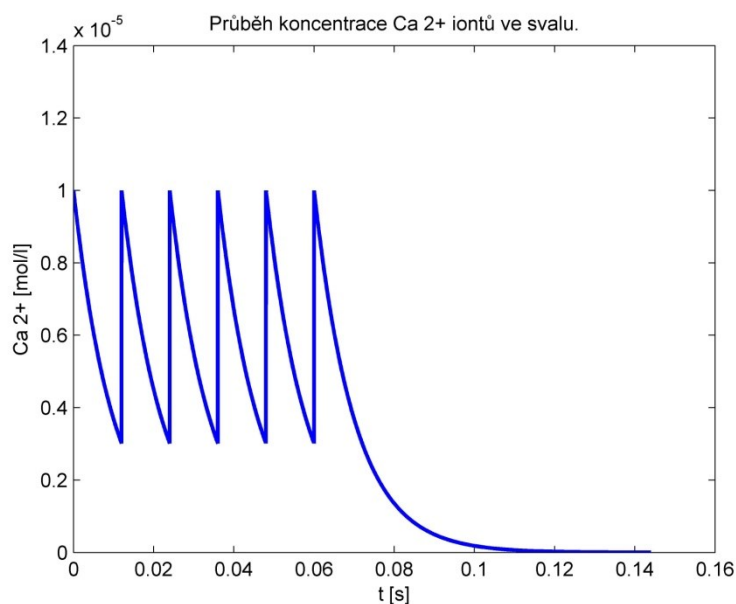
- $T = 0,008 \text{ s}$



Obrázek 4-2: Průběh koncentrace Ca²⁺ iontů.

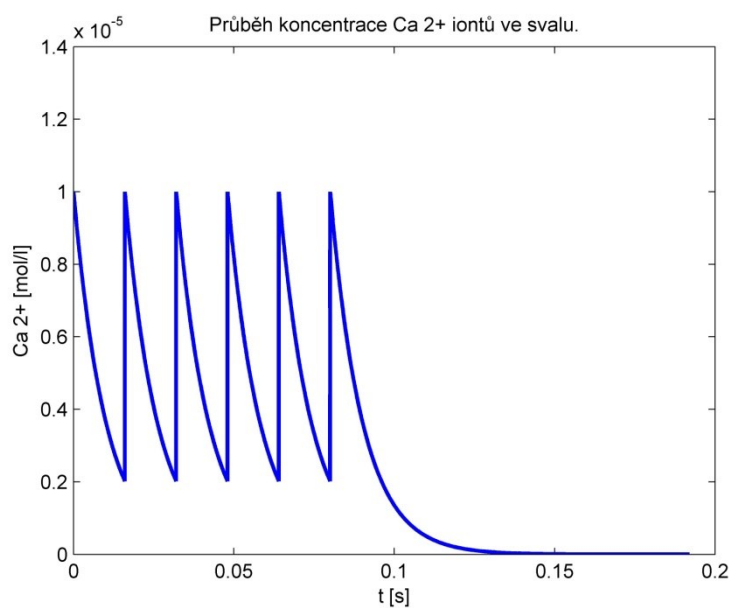
C. Vzorový protokol

- $T = 0,012 \text{ s}$



Obrázek 4-3: Průběh koncentrace Ca^{2+} iontů.

- $T = 0,016 \text{ s}$



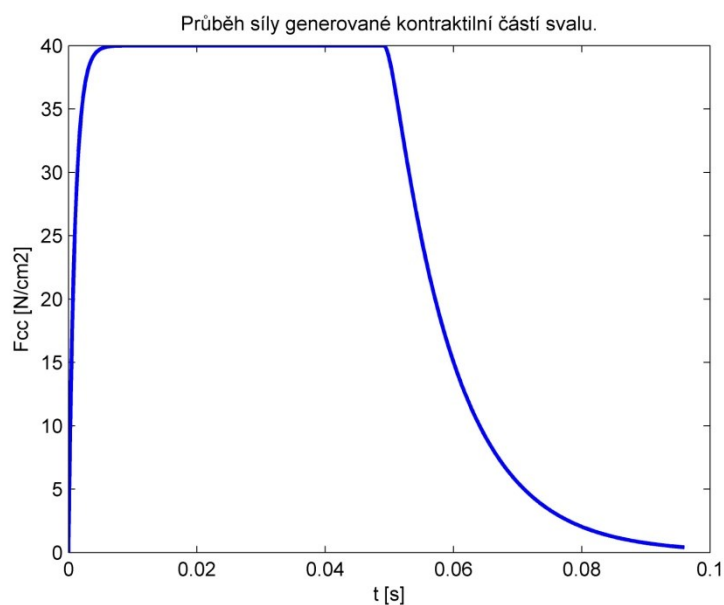
Obrázek 4-4: Průběh koncentrace Ca^{2+} iontů.

Obrázky 2, 3 a 4 interpretují průběh koncentrace vápníkových iontů v sarkoplazmě. Rozdíl mezi nimi spočívá v míře poklesu koncentrace po každém vzruchu. To je způsobeno rozdílným nastavením periody. Z trojic obrázků je naprosto zřejmé, že čím je hodnota periody

C. Vzorový protokol

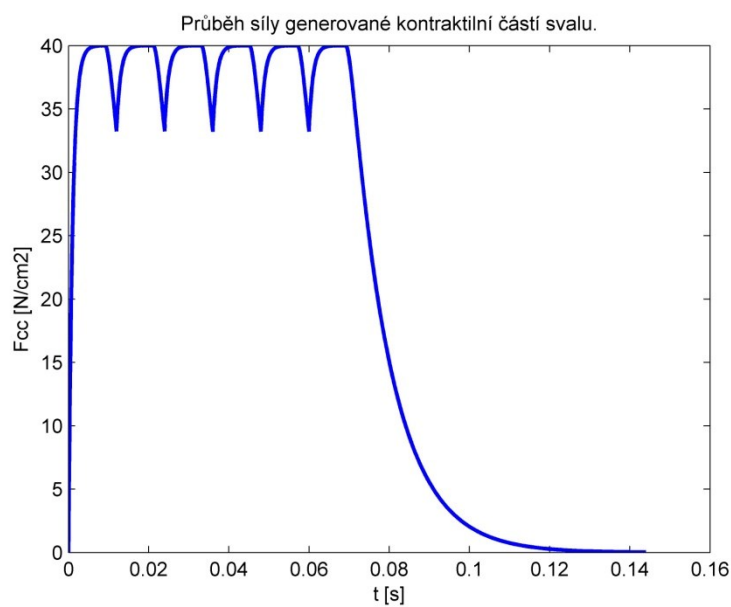
menší, tím méně času mají vápníkové ionty na návrat do retikula a nedojde k tak brutálnímu poklesu jejich koncentrace mezi jednotlivými vzruchy.

- $T = 0,008 \text{ s}$



Obrázek 4-5: Průběh aktivní síly.

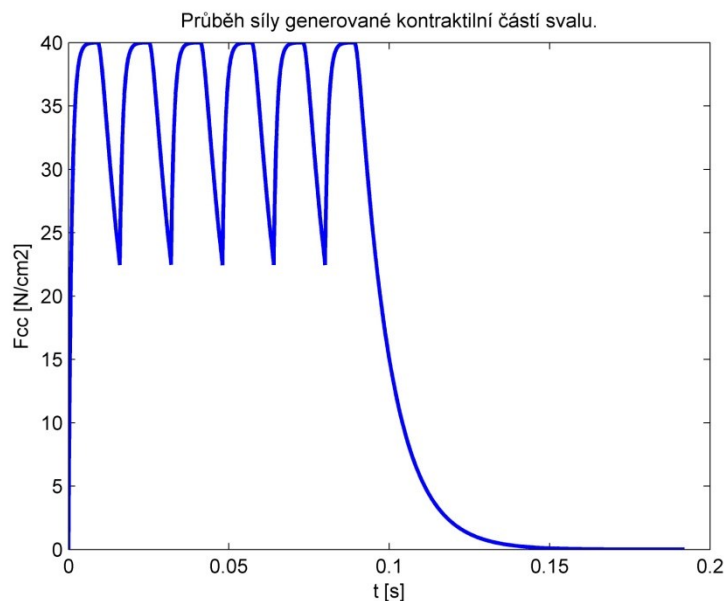
- $T = 0,012 \text{ s}$



Obrázek 4-6: Průběh aktivní síly.

C. Vzorový protokol

- $T = 0,016 \text{ s}$

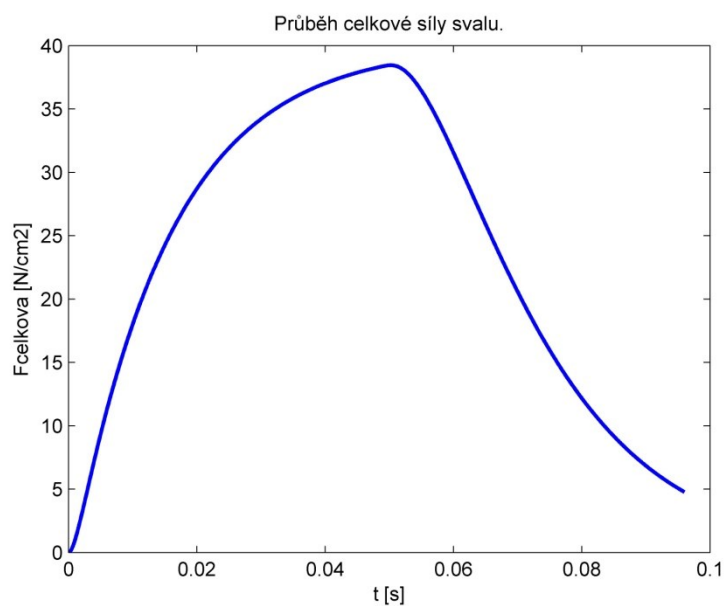


Obrázek 4-7: Průběh aktivní síly.

Trojice obrázků 5, 6 a 7 ukazuje průběh síly, generované kontraktilním aparátem svalu. Tato síla je přímo ovlivněna koncentrací vápníkových iontů z předchozí sady obrázků. Průběh síly na obrázku 5, který vzešel z průběhu koncentrace iontů na obrázku 3, vykazuje díky krátké periodě hladký tetanus – nedochází tedy k poklesu síly mezi jednotlivými vzruchy. Na obrázcích 6 a 7 již dochází k poklesům síly mezi jednotlivými vzruchy. Průběhy tedy mají charakter vlnitého tetanu.

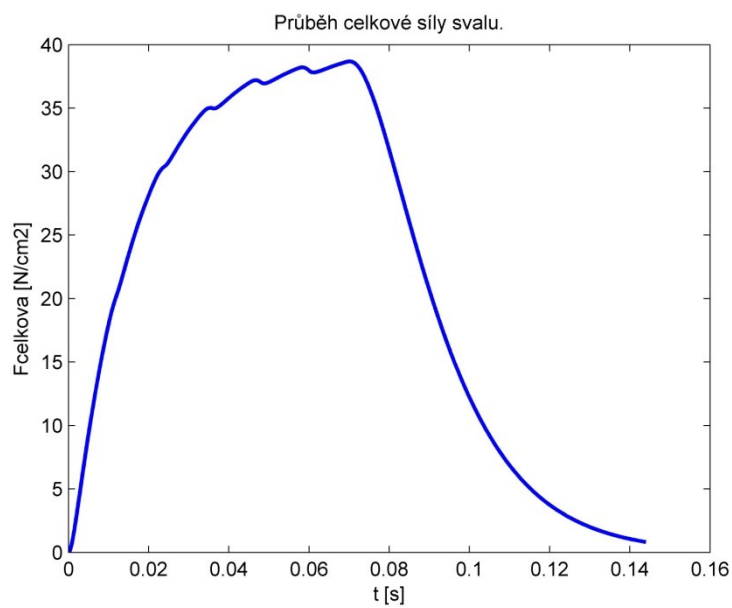
C. Vzorový protokol

- $T = 0,008 \text{ s}$



Obrázek 4-8: Průběh celkové síly svalu.

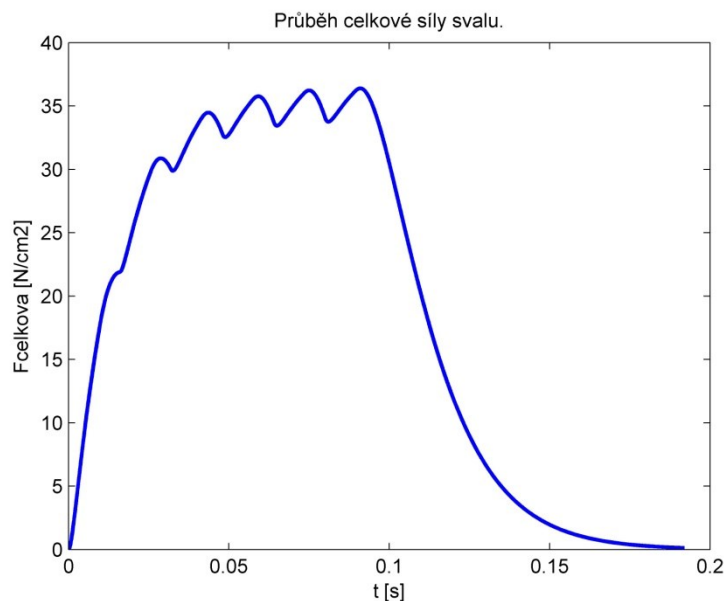
- $T = 0,012 \text{ s}$



Obrázek 4-9: Průběh celkové síly svalu.

C. Vzorový protokol

- $T = 0,016 \text{ s}$



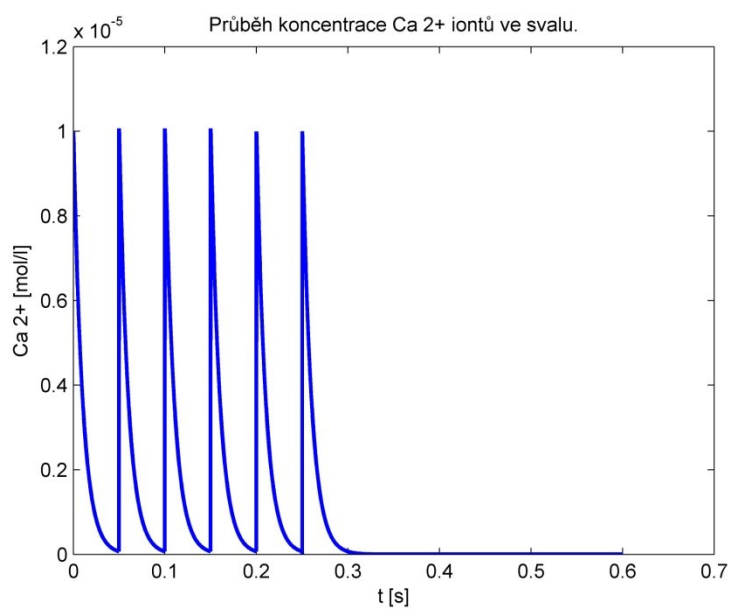
Obrázek 4-10: Průběh celkové síly.

Průběhy na obrázcích 8, 9 a 10 se týkají celkové síly svalu. Opět navazují na předchozí trojici obrázků. Rozdíl je zde také stejný jako v předchozí sadě. Spočívá v průběhu tetanu. Na obrázku 8 se jedná o tetanus hladký, obrázky 9 a 10 ukazují průběhy s tetanem vlnitým.

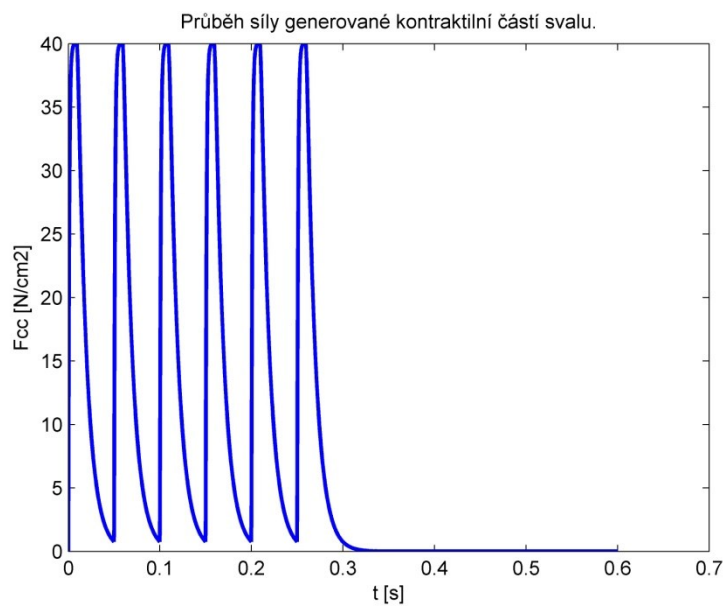
4.2 Výsledky k bodu č. 3 zadání

S postupným zvyšováním periody klesá koncentrace vápníkových iontů mezi jednotlivými impulsy a tím vznikají čím dál větší oscilace v průběhu aktivní i celkové síly. Při hodnotě periody 50 ms již mezi jednotlivými vzruchy dochází k úplnému poklesu koncentrace Ca^{2+} iontů, tím pádem nedochází k jejich sumaci a nevzniká tak kontrakce v pravém slova smyslu. Výsledky této simulace jsou na obrázcích 4-11 – 4-13.

C. Vzorový protokol

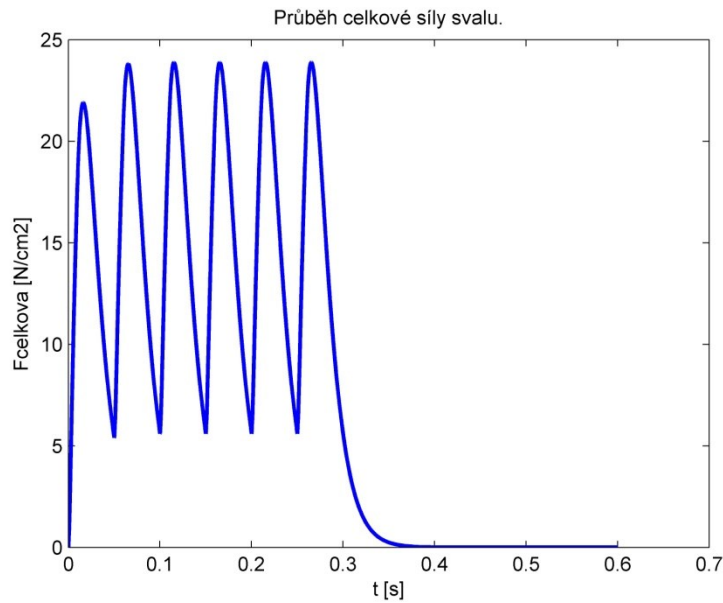


4-11: Průběh koncentrace Ca^{2+} iontů.



4-12: Průběh aktivní síly.

C. Vzorový protokol



4-13: Průběh celkové síly.

4.3 Kontrolní otázky

1. Který děj předchází kontrakci?
Excitace.
2. Co je vstupem bloku pro simulaci aktivní síly?
Průběh koncentrace vápníkových iontů.
3. Jaký je rozdíl mezi aktivní a celkovou silou svalu?
Aktivní síla je síla, generovaná pouze interakcí aktinových a myozinových vláken. Celková síla je součtem veškerých sil – síly aktivní, pasivní elastické síly a případně i síly zátěže (odporové síly).
4. Při jaké periodě vykazují silové průběhy hladký tetanus?
Při periodě 8 ms.
5. Při jaké periodě již nedojde k vybavení kontrakce? Proč je tomu tak?
Při periodě 50 ms. V tomto případě již dojde k úplnému poklesu koncentrace vápníkových iontů a při každém vzruchu tak síla stoupá z nuly.

5 Závěr

Velikost periody má přímý vliv na to, jaké množství vápníkových iontů se mezi jednotlivými vzruchy stihne vrátit zpět do retikula. Protože právě koncentrace vápníkových iontů je stěžejní pro průběh síly, příliš velká perioda se projeví negativně vzhledem k průběhu aktivní a následně i celkové síly svalu.